المنظمة العربية للترجمة

ليون م. ليديرمان
كريستوفر ت. هيل

التناظر والكون الجميل

ترجمة

نضال شمعون

بدعم من مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

المنظمة العربية للترجمة

ليون م. ليديرمان
كريستوفر ت. هيل

التناظر والكون الجميل

ترجمة

نضال شمعون

بدعم من مؤسسة محمد بن راشد آل مكتوم

الفهرسة أثناء النشر - إعداد المنظمة العربية للترجمة
ليديرمان، ليون م.
التناظر والكون الجميل/ ليون م. ليديرمان وكريستوفر ت. هيل؛ ترجمة نضال شمعون.
608 ص. - (تقنيات وعلوم تطبيقية)
ببليوغرافيا: ص 597 - 601.
يشتمل على فهرس.
ISBN 978-9953-0-1627-6
1. الكون. 2. الفيزياء - نظريات. أ. العنوان. ب. هيل، كريستوفر ت. (مؤلف). ج. شمعون، نضال (مترجم). د. السلسلة.
500

«الآراء الواردة في هذا الكتاب لا تعبّر بالضرورة
عن اتجاهات تتبناها المنظمة العربية للترجمة»

Lederman, Leon M. and Hill, Christopher T.
Symmetry and the Beautiful Universe

المنظمة العربية للترجمة

بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 5996 - 113
الحمراء - بيروت 2090 1103 - لبنان
هاتف: 753031 - 753024 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot.org.lb - http://www.aot.org.lb

توزيع: **مركز دراسات الوحدة العربية**
بناية «بيت النهضة»، شارع البصرة، ص. ب: 6001 - 113
الحمراء - بيروت 2407 2034 - لبنان
تلفون: 750084 - 750085 - 750086 (9611)
برقياً: «مرعربي» - بيروت / فاكس: 750088 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - Web Site: http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، كانون الأول (ديسمبر) 2009

المحتويات

قيل في الكتاب

«لم ينجح كتابٌ في إبراز أهمية التناظر للفهم العلمي للطبيعة كما فعل كتاب ليون ليديرمان وكريس هيل. لقد التقطا أحدَ أعمق المفاهيم في العلم وأماطا اللثام عن جوهره بشكل أنيق وواضح بعيداً عن التعقيدات التقنية، مستكشفَين علاقاته مع أمور الحياة اليومية ومع المعاني العميقة للعلوم التحتية. يشكّل التناظر مبدأً مرشداً في الفيزياء الحديثة، وتعبيراً عن قوة الجمال في الكشف عن الحقيقة».

توم سيغفريد (Tom Siegfried) ـ محرّر مختص بالعلوم

أخبار الصباح في دالاس (*Dallas Morning News*)

مؤلف كتاب **المواد الغريبة** (*Strange Matters*).

«كغيري من الناس، جذبني وحيّرني مفهوم التناظر بكلّ أسراره في عالَمنا الطبيعي. في هذا الكتاب الممتع والملهم، يقوم ليون ليديرمان وكريستوفر هيل بما يشبه حياكة متقنة لقطعة نسيج فنّية رائعة عندما يكشفان المعاني العميقة والكبيرة للتناظر. سواء أكنتَ فيزيائياً أم رياضياتياً أم شاعراً أم فناناً فإن نظرتك للعالَم ستختلف بعد قراءتك لكتاب **التناظر والكون الجميل**».

روجر و. بايبي (Rodger W. Bybee)، المدير التنفيذي

دراسة المناهج العلمية البيولوجية

مدينة كولورادو سبرينغز (Colorado Springs)، ولاية كولورادو.

«إن التناظر مسؤول عن شكل عالَم الطبيعة من أصغر مكوّناته أي الكواركات إلى أكبرها أي أصقاع الكون الشاسع. لقد كتب هيل وليديرمان كتاباً ممتعاً يمكن لأي شخصٍ ذي فضولٍ علمي أن يقرأه كي يستوعب المقتضيات العميقة لمفهوم التناظر السهل والرائع في نظام وتصميم كوننا».

روكي كولب (Rocky Kolb)، عالم كونيات

مختبر مسرّع فيرمي الوطني (Fermi National Accelerator Laboratory)

مؤلف كتاب **مراقبو السماء العميان** (*Blind Watchers of the Sky*).

«يأخذ ليديرمان وهيل القرّاء معهم في رحلةٍ منوِّرة عن الفيزياء الحديثة والكونيات من خلال اتّخاذهما للتناظر كمرشدٍ رئيس. ووجهة نظرهم هذه ذات قيمة كبيرة، وكذلك هي ضرورية للغاية».

مايكل ريوردان (Michael Riordan)

مؤلف كتاب **اصطياد الكوارك** (*The Hunting of the Quark*).

إهـــداء

يهدي ليون الكتابَ إلى أساتذته في مدرسة P. S. 93 في دائرة برونكس (Bronx)، وفي مدرسة جيمس مونرو (James Monroe) الثانوية.

يهدي كريستوفر الكتابَ إلى والديه، روث ف. هيل (Ruth F. Hill) وجيلبرت س. هيل (Gilbert S. Hill).

شكر وتقدير

نشكر شاري بيرتان (Shari Bertane)، كارول براندت (Carol Brandt)، رونالد فورد (Ronald Ford)، ستانكا جوفانوفيتش (Stanka Jovanovic)، جيلبرت هيل (Gilbert Hill)، دونالد لوريك (Donald Lorek)، نيل نيولون (Neil Newlon)، لاورا نيكرسون (Laura Nickerson)، إيرين بريتزكر (Irene Pritzker)، بونّي شنيتا (Bonnie Schnitta) وسوزان تاتنال (Susan Tatnall)، على تعليقاتهم القيّمة وأفكارهم المنوِّرة ومشاركتهم لنا الفلسفةَ نفسها، وعلى نكاتهم المرحة، وعلى قراءتهم للعديد من أقسام هذا الكتاب خلال مراحل متعدِّدة مرَّ بها تأليفه. نشكر كذلك زملاءنا الفيزيائيين على مساعدتهم وعلى تعليقاتهم الثاقبة، ونخصّ بالذكر آندي بيريتفاس (Andy Beretvas)، بيل باردين (Bill Bardeen)، روجر ديكسون (Roger Dixon)، جوش فريمان (Josh Frieman)، دراسكو جوفانوفيتش (Drasko Jovanovic)، كريس كويغ (Chris Quigg)، ستيفن بارك (Stephen Parke) وآل ستيبينس (Al Stebbins).

نشكر شي فيريل (Shea Ferrell) على عمله الفني الرائع، وبربارة غروب (Barbara Grubb) المسؤولة عن المحفوظات المرئية في أرشيف كلية براين مور (Bryn Mawr).

نشكر بشكل خاص الناشرَين الصبورَين والمتفانيَين اللذين عملنا معهما: بنيامين كيلر (Benjamin Keller) وعلى وجه الخصوص ليندا غرينسبان ريغان (Linda Greenspan Regan) على مجهودهما في إتمام هذا العمل.

لقد استفدنا كثيراً من ملاحظات الأشخاص الذين زاروا موقعنا على شبكة الإنترنت www.emmynoether.com وأرسلوا لنا بالبريد الإلكتروني تعليقاتهم على محتويات الموقع السابقة التي كانت حجر الزاوية الذي بُنيت عليه فكرة الكتاب. وأخيراً نقدّم جزيل الشكر إلى السبعة آلاف ونيّف من الطلاب الذين التحقوا ببرنامج محاضرات الفيزياء صباح أيام السبت في مخبر فيرمي، والذين تمَّ عرض بعض طروحات تلك المحاضرات لأول مرة عليهم، ومنهم أتانا الإلهام الذي دفعنا لتأليف هذا الكتاب. ونقدّم لهم أيضاً أحرّ تمنياتنا بالنجاح في عملهم، حيث إن مستقبلنا يعتمد بشكلٍ حاسم على ذلك.

مقدّمة

ما هو التناظر؟

التناظر موجود في كلّ مكان، فله تجسّداتٌ لا حصر لها في الأنماط اللامتناهية العدد التي تزوّدنا بها الطبيعة. إنه عنصر ذو أهمية قصوى، فهو الركيزة الأساسية للفنّ والموسيقى والرقص والشعر والعمارة، كما أنه موجود في كلّ العلوم مع تبوّئه مكانةً بارزة في الكيمياء والبيولوجيا والفيزيولوجيا والفلك. إن الاعتبارات التناظرية متجذّرة في العالَم الداخلي لبنية المادة، وفي العالَم الخارجي للفضاء الكوني، وكذلك في عالَم الرياضيات التجريدي. ويمكن القول إنّ كلّ قوانين الفيزياء الأساسية وإنّ غالبية الحقائق الأساسية التي يمكننا التصريح بها عن الطبيعة تعتمد بشكلٍ ما على اعتبارات تناظرية.

تعود أولى لقاءاتنا مع التناظرات إلى مرحلة الطفولة، ففيما نراه ونسمعه ونختبره من حالاتٍ وأحداثٍ متعدّدة يبدو لنا أنها كلّها تخضع لنوعٍ من العلاقات التناظرية. نحن نصادف تناظراً فاتناً في تويجات الورود، في خطوط صَدَفات البحر التي تضاهي أشعة

الشمس، في بيضة عادية، في أغصان شجرةٍ فارعة الطول وفي العروق الصغيرة لورقاتها، نصادفه في ندفة الثلج، ونصادفه عندما نتأمّل بخشوع خط الأفق الذي يفصل السماء عن البحر. إذا نظرنا إلى قرصَي الشمس والقمر وراقبنا حركتيهما في السماء، في النهار أو في الليل، سنجدّ ما يمكن أن نسميه تناظراً مثالياً، فمساراهما يرسمان لنا دائرتين تتمتعان بتناظر كاملٍ ظاهرياً. إذا أصغينا إلى نقرات الطبل أو إلى عدة نغمات بسيطة متتالية في أغنية ما أو حتى في زقزقة عفوية لعصافير عابرة، سنجد التناظر. نحن شهود عيان على وجود التناظر كلما أحسسنا بمرور الزمن، كلما درسنا دورة حياة كائن متعضٍّ، وكلما مرت علينا دورة من دورات الفصول الأربع وهي تتكرّر بانتظام سنة بعد سنة.

منذ آلاف السنين شعر الإنسان بشيءٍ ما يقوده غريزياً نحو مساواة التناظر بالكمال. لقد ارتأى المعماريون القدماء أن تتمتّع بعض تصاميمهم وإنشاءاتهم بتناظرات متنوعة، وسواء أكان ذلك في معبد يوناني قديم أم في قبر أحد الفراعنة أم في كاتدرائية مبنية خلال العصور الوسطى، فقد مثّل كلّ من هذه الإنشاءات المكانَ الذي اختاره «إله» كي يتّخذه مسكناً. تتضمّن روائع الشعر العالمي ـ مثل **الإلياذة** (*Iliad*) و**الأوديسة** (*Odyssey*) و**الأينيدا** (*Aeneid*) ـ درجاتٍ عالية من التناظر في إيقاعها ووزنها الشعري خصوصاً عندما تحتفي بالآلهة أو بعرائس الشعر والغناء. ولو أصغينا إلى فوغا لباخ (Bach) وأصداء أنغامها المعزوفة على آلة الأورغن تتردّد في سقيفة كاتدرائية ضخمة، فإن الأصوات ستبدو صادرةً بتناظر رياضياتي، كما لو كانت هابطةً علينا من أعالي السموات. إن التناظر يجعل أمزجتنا رائقةً صافية، تماماً مثلما يجلب مشهد غروب الشمس عند خط الأفق لمحيطٍ شاسع الامتداد الراحةَ والسكينة إلى أفئدتنا. تؤكد التناظرات

التي نشعر بوجودها ونراها في عالَمنا فكرةَ تواجد ترتيب تام وانسجام كامل وراءَ أيّ شيءٍ يحدث في الكون. إننا نحس من خلال التناظر بوجود نوع من المنطق في آلية عمل الكون، وهذا وإن كان واقعاً خارج نطاق عقولنا، فإنه بالتأكيد يلقى تجاوباً صريحاً منها.

عندما يُسأل الطلاب عن كيفية تعريفهم **للتناظر**، فإن إجاباتهم تكون عموماً كلّها صحيحة، وها هي نماذج من الإجابات عن السؤال «ما هو التناظر؟»:

«إن التناظر أمرٌ مشابهٌ لكون الأضلاع ـ أو الزوايا ـ لها نفس القيمة في مثلث متساوي الأضلاع».

«يعبّر التناظر عن كون الأشياء متناسبةً مع بعضها البعض بالنسبة نفسها».

«يحدث التناظر عندما تبدو الأشياء بالشكل نفسه مهما نظرت إليها من نقاط مختلفة».

«إنّ التناظر هو أن تبدو الأقسام المختلفة من جسم ما كما لو كانت هي نفسها، مثل حالة الأذنين أو العينين في الوجه».

هذه كلّها انطباعات بصرية عن التناظر. ومع ذلك يمكننا أن نلاحظ أنها تتضمّن مفهوماً أكثر تجريداً: فنحن نرى أن كلمة «نفس» مكوّن أساسي في جميع هذه التعاريف. وفي الحقيقة يمكن تقديم التعريف التالي لكلمة **تناظر**:

التناظر هو: تعبير عن التكافؤ بين الأشياء.

يقتضي التناظر وجودَ أكثر المفاهيم الرياضياتية أهميةً: **التكافؤ**. عندما يكون الشيئان هما الشيء نفسه، أو عندما يكونان متكافئين، فإننا نقول في الرياضيات إنهما متساويان، ونستخدم الرمز الشائع = للدلالة على ذلك. إذاً التناظر هو تعبير عن التساوي بين الأشياء.

وهذه الأشياء يمكن أن تكون أجساماً مختلفة، أو أقساماً متباينة من الجسم نفسه، أو أن تكون مظاهر للجسم نفسه **قبل** و**بعد** أن نجري عليه بعض الأمور.

يمكن أن نعني بتعبير (منظومة فيزيائية) أيّ جسيم بسيط مثل الذرة، ويمكن أن نعني به تركيبة معقّدة من الجسيمات، مثل الجزيء أو الصخرة أو جسم الإنسان أو الكوكب أو حتى الكون برمّته، طالما تتحرك وتتصرف وفقاً لقوانين الفيزياء، فمن حيث المبدأ كلّ شيءٍ يصبح منظومةً فيزيائية عندما ننظر إليه من خلال الفيزياء. نقول إن منظومةً فيزيائية **تتمتّع بتناظر ما** إذا استطعنا إجراء **تغييرٍ** على المنظومة، بحيث **تبقى المنظومة بعد إجراء التغيير تماماً كما كانت قبله**. ندعو مثل هذا التغيير **بتحويل تناظري** أو **بعملية تناظرية**. إذا بقيت المنظومة نفسها عند إجراء تحويلٍ عليها دعوناها **لامتغيّرةً (أو صامدةً) بالنسبة إلى التحويل**.

وهكذا يمكن للشخص العلمي اعتماد التعريف التالي للتناظر: **يعبّر التناظر عن سمةٍ للشيء أو للمنظومة لامتغيّرة عند إجراء تحويل عليها**. تعبّر سمة **اللاتغيّر** عن ثبات وبقاء المنظومة على شكلها ومظهرها وتركيبها وتنظيمها، بينما يعبّر **التحويل** عن المفهوم التجريدي لفعل نقوم من خلاله بنقل المنظومة من حالةٍ ما إلى حالةٍ أخرى مكافئةٍ لها. ويكون لدينا عادةً الكثير من التحويلات التي يمكن أن نطبّقها على منظومةٍ معيّنة كي ننقلها إلى حالةٍ مكافئة لحالتها.

تزوّدنا مزهرية الورود الصينية ـ قبل طلائها بالزخرفات التزيينية ـ بمثالٍ بسيطٍ عن تناظر هندسي. إذا وضعنا المزهرية على المنضدة وأدرناها بمقدار زاويةٍ ما اعتباطية (مثلاً 37,742 درجة)، فلن يتغيّر مظهرها أو تركيبها الفيزيائي: إذ إن صورتَي المزهرية «قبل» و«بعد» التدوير ستكونان متطابقتين. إن المزهرية لامتغيّرة بالنسبة إلى

الدورانات حول مستقيم تخيّلي في الفضاء يمر من مركز المزهرية، وندعوه **محورَ التناظر**. يبيّن هذا المثال ببساطة أن تعريفنا الرياضياتي للتناظر يتوافق مع خبراتنا الحياتية التي نحصل عليها بواسطة الإدراك الحسّي بل والعاطفي كذلك، في أن التناظر يزيد من القيمة الجمالية للمزهرية المتمثّلة في شكلها ومظهرها.

التناظر في الموسيقى

دعونا نتمعَّن بفكرة التناظر ضمن مجالٍ مألوف للجميع، وإن كان ليس من الأمور المرئية، فكما قلنا سابقاً، التناظر موجود في كل مكان، خاصةً في مجال الفنون، وهذا يشمل أحد أعظم تجلّياتها وهو الموسيقى.

في عصر يوهان سيباستيان باخ (Johann Sebastian Bach) حدث تطوّر مهم في الموسيقى الغربية، حيث تمَّ تجاوز الأنماط الباروكية الموروثة من عصر النهضة والتي كانت أكثر بساطة في خطوطها العامة. وبذلك دخلت الموسيقى عصراً جديداً اتّسم بمجالاتٍ أوسع من الأحاسيس والعواطف والتقلّبات الوجدانية التي تُسمّى بالألمانية الأفّيكت (Affekt) (الأثر). وعلاوةً على هذا طرأت على الموسيقى تطورات وتغييرات كثيرة من ناحية الشكل والبنيان، أي من ناحية ما يمكن اعتباره طراز البناء المعماري لها.

حصل باخ عام 1700 ـ عندما كان لا يزال يافعاً في الخامسة عشرة من عمره ـ على منحة دراسية في مدرسة مايكل (Michaelisschule) في مدينة لونيبورغ(*) (Lüneburg) على بعد

[إن جميع الهوامش المشار إليها بأرقام تسلسلية هي من وضع المؤلف، أما تلك المشار إليها بـ (*) فهي من وضع المترجم].

(*) مدينة في ألمانيا بالقرب من مدينة هامبرغ.

حوالي ثلاثين ميلاً من مدينة هامبورغ الواقعة في شمال ما يُعرف اليوم بدولة ألمانيا[1]. خوّلته هذه المنحة أن يدرس مجاناً بالإضافة إلى تأمين السكن والطعام ومنحه راتباً شهرياً على خدماته كعضوٍ في كورال الكنيسة التي تضمَّنت قيامه بالعزف خلال أيام الأحد وخلال الزيجات والجنازات وغيرها من المناسبات. لقد كان صوته ينتمي إلى طبقة السوبرانو العالية، لذا توقفت منحته ـ ومعها حياته المهنية كطالب ـ عندما تغيّرت نوعية صوته.

كانت الأجواء الفكرية ـ بما فيها تلك المعنية بالموسيقى ـ في مدينة لونيبورغ تتّصف بالتنوّع، مما أدى دوراً محفِّزاً بالنسبة إلى أي طالب موسيقي شابّ. وهنا اكتشف باخ لأول مرة أسلوباً جديداً «تناظرياً» في التأليف الموسيقي، كان قد شوهد من قبل في مؤلّفات الموسيقيين الفرنسيين في ذلك العصر، من أمثال فرانسوا كوبران (Francois Couperin). خضعت الموسيقى تحت تأثير مثل أولئك الموسيقيين لتبدّلات بنيوية وشكلية، غدت وفقاً لها أكثر ميلاً للنواحي الإنسانية الحميمية وأكثر اتّصافاً بالبراعة وبالغموض، فأصبحت أكثر تمثيلاً لفعاليات الحياة اليومية مثل الحركات الراقصة التي تهدف للتغزّل أو التودّد للأحباب. ومن خلال ذلك التشابه مع الرقص اكتسبت الموسيقى درجةً أكبر من التناظر[2].

---

(1) Albert Schweitzer, *J. S. Bach*, English Translation by Ernest Newman (New York: Dover Publications, [1966]), pp. 99-101 and 227.

(2) يقدّم الأستاذ تيموثي سميث من جامعة أريزونا الشمالية في مقالتَيه: Timothy Smith: «Sojour: The Canons and Fugues of J. S. Bach,» http://jar.ucc.nau.edu, and «Lüneburg, (1700-1703),» http:// jan.ucc.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 7 أيار/ مايو 2004)، سيرةً عن حياة باخ مع سردٍ ممتع لتاريخ شكل المؤلّفات الموسيقية ولتحليل علاقة ذلك الشكل مع التناظر. ابتكر الأستاذ سميث مصطلحَ **تقنية الكرّ والفرّ** لوصف الأنماط التناظرية المعقّدة الموجودة في موسيقى باخ.

إنّ ضربات الطبل البسيطة المنتظمة تمثّل بإيقاعها المتكرّر نوعاً من التناظر عبر الزمن، فإيقاع أو نظم ضربات الطبل هو متتالية من الأصوات تنطلق في فتراتٍ متساوية من الزمن. وبالرجوع إلى تعريفنا للتناظر نجد أنّ **تساوي الفترات الزمنية** الفاصلة بين ضربات الطبل هو الشيء **اللامتغيّر** هنا، بينما **مرور الزمن** هو الذي يعبّر عن الشيء المتغيّر أو عن **عملية التحويل**. يقدّم الانتظام الفيزيولوجي لضربات قلب الإنسان مثالاً آخر على التناظر، وبالمقابل فإن اللانظمية القلبية هي تعبير عن اللاتناظر. وكما تمثّل ضربات القلب إيقاعَ الحياة، فإنّ ضربات الطبل تحتّل نفس المكانة بالنسبة إلى الموسيقى، حتى إنه يمكننا القول إن ارتقاء الموسيقى حدث انطلاقاً من إيقاع الطبل.

كان المؤلَّف الموسيقي النموذجي في الماضي يتضمَّن لحناً رئيسياً لنرمز له بـ X، وكان هذا اللحن الرئيسي يُعزَف مراراً وتكراراً وذلك من خلال مقام موسيقي معيّن. لنأخذ بعين الاعتبار مثلاً المقطوعة الموسيقية الشهيرة والمحبوبة كانون (Canon) لباكالبيل (Pachelbel) من مقام ري. لقد وُلد يوهان باكالبيل قبل حوالي ربع قرن فقط من باخ، وساهم في انتشار ونمو المفردات الموسيقية للقرن الثامن عشر. تُظهِر مقطوعة الكانون لباكالبيل من مقام ري التناظرَ الخاصّ بموسيقى الباروك، فهذه المقطوعة تتشكَّل أساساً من لحن رئيسي يتألف من متتالية تآلفات نغمية معيّنة هي: ري - لا - سي الصغير - فا دييز الصغير - صول - ري - صول - لا. وهذه المتتالية تتكرّر مراراً وبشكل مستمر يقارب بانتظامه إيقاع دقّات الساعة. ولكنّ هذا التكرار لا يتمّ إلاّ مع إجراء بعض التغييرات الذكية والزخرفات الدقيقة حيث تخرج بعض الأصوات ليدخل غيرها في تناغمٍ إجمالي فائق.

لا يوجد بالطبع أيّ خطأ في هذه الطريقة للتأليف الموسيقي،

ولا يزال الملحنون المعاصرون يستخدمونها لإثارة ذلك النوع من المشاعر الوجدانية الذي يتّصف بسرعة الزوال، كما نجد مثلاً في مقطوعة البوليرو (Bolero) لرافيل (Ravel) في القرن العشرين، فمقطوعة الكانون تعطينا الشعور بوجود حركة ثابتة في الحوادث إلى الأمام، وهذا يوفّر الخلفية اللازمة للوصول إلى خاتمة ذروية. أما الموسيقى في عصر باخ فقد بدأت تستنبط أنماطاً تناظريةً أكثر تعقيداً، ومثّل ذلك أول **الأشكال الموسيقية التركيبية**[3]. احتوت المؤلَّفات الموسيقية هنا على بنى دُعيت باسم الحركات، وهذه البنى كانت في الحقيقة تقليداً لبعض الرقصات، التي بدورها كانت تحاكي أفعالاً نراها في الطبيعة. أطلق على هذه الحركات تسميات **الأليماند** (Allemandes)، **الكوران** (Courants)، **الساراباند** (Sarabandes)، **الجيغي** (Gigues)، **والفوغا** (Fugues)، وذلك كشكل من أشكال الاستعارة من أسماء الرقصات الشائعة في ذلك العصر. كانت هذه

(3) انظر: Timothy Smith, «Bach: The Baroque and Beyond; The Symmetrical Binary Principle,» http//jan.ucc.nau.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 15 تموز/ يوليو 2004).

يستشهد مانفرد ف. بوكوفزر (Manfred F. Bukofzer) في كتابه *Music in the Baroque Era* بقولٍ للمؤرِّخ أبوت جان - برنارد لوبلانك (Abbot Jean-Bernard LeBlanc) (وهو معاصرٌ لباخ): «أدّى تقليدُ الرقصات في فنّ ترتيب النغمات - حيث تتّصل الجمل الموسيقية بعضها مع بعض وتتداخل كأنها خطوات متضافرة سويةً في رقصات نموذجية- مع التنسيق المتناظر للمقاييس الموسيقية إلى صياغة ذلك المُبتكَر المعروف باسم **القطعة** (Pièce) التي تمثّل الشعرَ في الموسيقى. إنّ مجمل أهداف الأمّة الفرنسية موجّهة نحو... ذلك التقسيم **المتناظر** البارع الذي يُكسِب **القطعةَ** ما تتمتع به من صور موسيقية يمكن مقارنتها بالتزيينات والزخرفات الجميلة التي نجدها ضمن عرائش خشب البقس المنتشرة في جنائن التويلري (Tuileries)، انظر: Manfred F. Bukofzer, *Music in the Baroque Era* (New York: W. W. Norton, [1947]), p. 351.

[التويلري: جنائن ملكية في باريس بالقرب من اللوفر].

الحركات ضمن المؤلَّف الموسيقي محكومةً بمجموعة من القواعد الصارمة التي تحدّد بالضبط النمط التناظري لكلّ منها.

لشرح تلك القواعد نسمّي الحركة الأولى بـ X، ونجد أنها تمثّل اللحن الرئيسي للمقطوعة مكتوباً من خلال المقام التعريفي (أي النغمي (Tonic)) وهو يتغيّر أو ينتقل إلى المقام المسيطر (Dominant) (مثلاً ينتقل مقام دو الكبير التعريفي إلى مقام صول). ويلي ذلك مجيء الحركة الثانية Y التي تكون استمراراً للحن الرئيسي في المقام المسيطر الذي يعود وينتقل بحركة معاكسة إلى المقام النغمي (في مثالنا يعود مقام صول الكبير لينتقل إلى مقام دو). وقد تمَّ توسيع هذه البنية XY ـ المسماة بالشكل الثنائي ـ إلى أنماطٍ أخرى تابعة لها في العديد من المؤلّفات الموسيقية، منها على سبيل المثال البنية XXYY التي تُدعى الشكل الثنائي المتكرر. تُعتبر الأشكال الأخرى اللاحقة ـ كالشكل الذي نجده مثلاً في سوناتات بيتهوفن والمعروف بنمط السوناتا السريع لمدينة فيينا ـ تُعتبر تعميماً لنمط التناظر الأساسي، حيث تكون Y نسخة بديلة عن X وذلك من خلال مقام ذي علاقة بمقامها التعريفي لكنه ليس المقام المسيطر، كأن يكون المقام الصغير الموافق (على سبيل المثال إذا كانت X في المقام التعريفي لـ دو الكبير، عندها تأتي Y وكأنها X ولكن في مقام لا الصغير)، وفي العادة تحتوي Y على بعض التنويعات النغمية المضافة لـ X.

لقد ألمّ باخ بهذه المفاهيم الجديدة، ولكنه حقن الموسيقى بتناظراتٍ أعقد بكثير من هذه العيّنات الأساسية. توجد في كثيرٍ من مؤلَّفات باخ تقسيماتٌ جزئية تناظرية تُدعى بالعبارات (Phrase) وأنصاف العبارات (Semi-Phrase)، تحتوي على عيّنات متشابهة تعكس وتحاكي التناظر العام في بنية المقطوعة الموسيقية. ومن الموجودات التي تُعتبر علامةً بارزةً في مؤلَّفات باخ ما اصطُلح على

تسميته بتقنية الكرّ والفرّ (وقد ذكرناها سابقاً)، حيث يُستخدَم نفس اللحن لبناء مقاييس متشابهة في المقطعين X وY، لكن بترتيب معاكس للنغمات. تشكّل العبارات الموسيقية المنفردة مكوّناتٍ جزئية متناظرة للتركيبة العامة الأكبر منها، والتي تصبح بدورها هرميةً مؤلّفةً من هذه المكوّنات المتناظرة، مع تمتّعها بتنويعٍ واسع في عدة مستويات مختلفة زمنياً ومكانياً.

لا نتمكّن ـ نحن السامعين ـ عادةً من فهم مقطوعة لباخ لدى إصغائنا إليها لأول مرّة، ولابد لنا من الصبر ومن سماع القطعة عدة مرات قبل أن نبدأ باستيعاب العالَم الداخلي لهذه الألحان الرائعة، حينئذٍ يبدو لنا كما لو أن البنيان الهرمي المعقّد للمؤلَف قد اكتسب أجنحةً وبدأ بالتحليق عالياً في سماء الروعة والجمال. متى بدأنا نفهم بنية اللحن ينتابنا شعور بأننا دخلنا عاَلَماً جديداً وغنياً بعيّنات متتالية تتكشّف لنا الواحدة بعد الأخرى لتعرّفَ كوناً جميلاً أساسه المنطق والتناظر. إن قيمة الموسيقى لا تتوقّف على الآلة التي تُعزف عليها، فروعة موسيقى باخ سوف تتجلّى سواء أعزفناها على كازو (Kazoo) أو على محلّل إلكتروني (Electronic Synthesizer)، أم عزفناها على هاربسيكورد (بيانو قديم) (Harpsichord) أو على بايب أرغن (Pipe Organ) (أرغن أنابيب) كبير. في نهاية الأمر، ليس استخدام آلة معيّنة هو الذي يعطي الموسيقى طابعها البنائي، بل تلك البنى التناظرية الداخلية العميقة التي فيها وذلك الأثر الوجداني (الأفيكت) العام الذي تولّده.

الأرض كروية

يُكسب التناظرُ مقدرتنا الإبداعية أجنحةً تسمح لها بالتحليق، فهو يزوّدنا بمبادئ منظّمة لكلّ ما يحفّز دوافعنا الفنّية وأيضاً للطريقة

التي نفكّر بها، وهو مصدر إلهام لاقتراح فرضياتٍ من أجل فهم العالَم الفيزيائي. لنورد مثالاً رائعاً على ذلكَ بالعودة لكيفية اكتشافنا لكروية الأرض. إن الوصول لهذا الاكتشاف لم ينتظر حلول الألفية الثانية وقيام كولومبس (Columbus) أو ماجلان (Magellan) برحلاتهم التي حقّقت دوران الإنسان لأول مرة حول الأرض. لقد أنجز ماجلان مهمة إجراءِ «التجربة التأكيدية» لبرهان صحة النظرية (بالرغم من أنه شخصياً لم يستطع إتمامَ رحلته، حيث قُتل في أثناء محاولته الفاشلة لتحويل سكان الفيليبين إلى المسيحية[4]. لكنّ الرياضياتيين القدماء في اليونان كانوا بالأحرى يعرفون أنّ الأرض كروية، مثلها في ذلك مثل القمر أو الشمس، بل إنهم قاموا بقياس قطرها.

لقد لاحظ اليونانيون أنّ الأرض تحجب أحياناً أشعة الشمس عن القمر، مسبّبةً ما يُعرَف بخسوف القمر. وأمكن لهم - عبر ملاحظة ظلّ الأرض على القمر خلال الخسوف - رؤية الأرض كجسم دائري، فتوصّلوا إلى أنها كروية مثل القمر والشمس.

كان إيراتوسثينيس (Eratosthenes) (العالِم اليوناني ورئيس مكتبة الاسكندرية القديمة المشهورة في مصر) يعرف حوالي عام 240 قبل الميلاد بوجود بئر ماء عميق في مدينة أسوان (Syene) البعيدة إلى الجنوب. في يوم الانقلاب الصيفي (21 حزيران/ يونيو) الموافق لأطول نهارٍ في السنة، كان بالإمكان رؤية صورة الشمس الكاملة منعكسةً على ماء البئر لبرهة وجيزة عند منتصف النهار تماماً. لذلك لابدّ أن تكون الشمس فوق الرأس تماماً في أسوان عند منتصف النهار. مع ذلك لاحظ إيراتوسثينيس أن الأمر مختلف في مدينته

---

(4) William Manchester, A *World Lit Only by Fire: The Medieval Mind and the Renaissance Portrait of an Age* (Boston: Back Bay Books, 1933), p. 230.

الاسكندرية الواقعة على بعد 800 كلم (أو 500 ميل) إلى الشمال من أسوان، إذ لم تكن الشمس فوق الرأس تماماً في ذلك اليوم نفسه. وتبيَّن له بدلاً من ذلك أن الشمس انحرفت عن موقع السمت ـ وهي النقطة الواقعة فوق الرأس تماماً في السماء ـ بسبع درجات. استنتج إيراتوسثينيس أن اتجاه السمت في الاسكندرية يختلف عن اتجاهه في أسوان بسبع درجات، ومن ثم كان قادراً من خلال استخدام مبادئ الهندسة البسيطة على تقدير قيمة قطر الأرض، ووجدها مساويةً لـ 12800 كلم (8000 ميل)[5].

تعتمد القيمة الصحيحة لقطر الأرض ـ كما نعرف اليوم ـ اعتماداً بسيطاً على موضع قياسك لها، وهذا عائد بشكل رئيس **لتفلطح** الأرض حيث إن هذه القيمة تكون عبر خطّ الاستواء أكبر منها عبر القطبين، إضافةً لوجود ظواهر مثل الجبال وحوادث المدّ والجزر وغيرها من الأمور المشابهة، ممّا يقتضي إعطاء «قيمة وسطية» لا غير لقطر الأرض. يبلغ قطر الأرض عبر الاستواء حوالي 12760 كلم (7929 ميل) ويبلغ حوالي 12720 كلم (7904 ميل) عبر المحور القطبي. ويعني هذا أن إيراتوسثينيس قدَّر القيمة الصحيحة لقطر الأرض ـ مع افتراضه أنها كروية ـ بدقة رائعة يقلّ الخطأ فيها عن الواحد بالمئة. ويمكن اعتبار ذلك إنجازاً لافتاً للنظر للعلم في ذلك الوقت.

كما أوردنا سابقاً **ليست** الأرض ـ في الواقع ـ كرةً كاملة التناظر كما نعتبرها في التصوير الهندسي المثالي المجرّد. ليس التناظر الكروي إذاً إلاّ مجرّد تقريبٍ لشكل الكوكب الحقيقي الذي يتحدّد

(5) Will Durnat and Ariel Durant, *The Story of Civilization* (New York: Simon & Schuster, 1966), vol. 2: *The Life of Greece*, pp. 636-637.

بدوره ديناميكياً من خلال عملية يكتسب الكوكب فيها المادة بشكل متزايد ليتكوَّن لدينا جسم صلب كبير تحت تأثير الثقالة. لذا يكون من الخطأ مثلاً الاستنتاج أن تدخلاً إلهياً خلق الأرض بشكل كروي كامل، وبالنتيجة من الخطأ ربط ذلك بمنظومة دينية قائمة على الإيمان بكمال الشكل الكروي.

يمكن للتناظر أن يكون أداةً قوية المفعول حتى لو كان مجرّد تقريب للحقيقة. لكن كثيراً ما وقعنا ـ نحن البشر ـ في الخطأ، عندما كنّا نفترض تمتّع بعض الأجسام بتناظر كامل، بينما لم يكن ذلك التناظر أكثر من نوع من أنواع الانخداع أو نتيجة عرضية لأمرٍ آخر. لقد كان هذا هو الخطأ الذي ارتكبته نظرية بطليموس (Ptolemy) التي تفترض وجود نظام شمسي مركزه الأرض، والتي بقيت مسيطرة على الساحة الفكرية ـ خاصةً مع تلقّيها الدعم من المعتقدات الدينية ـ لمدة ألفٍ وخمسمئة سنة. فقد تمَّ اعتبار التناظر الذي تتمتّع به الدائرة الكاملة وكذلك الكرة أمراً إلهي المنشأ، وبذلك أصبح هذا التناظر ببساطة شيئاً **واجبَ** التواجد لأنه من صنع الله، وغدت تعبيراً مباشراً عن ذلك جميعُ الحركات المدارية للكواكب والشمس والقمر والنجوم حول الأرض التي افتُرض ثباتها في نقطة المركز.

توجد في واقع الأمر تناظراتٌ حقيقية في حركة الكواكب، لكن هذه التناظرات الحقيقية كانت خفية وعميقة بشكل يفوق ما استطاع أيّ شخص في ذلك الوقت تصوّره. تحلّى يوهان كبلر (Johannes Kepler) بذهنٍ فطِن وبعزيمةٍ دؤوبة سمحت له باكتشاف المبادئ النظرية الدقيقة التي تصف حركة الكواكب حول الشمس. لكن هذه المبادئ بدت بعيدة عن الكمال بشكل مخيّب للآمال، إذ انحرفت بشكلٍ كبير عمّا يوجبه التناظر الكروي الهندسي من تفضيلٍ لقوانين وقواعد معيّنة. ورغم ذلك كانت تلك المبادئ هي الأرضية التي

انطلقت منها أعظم مسيرة عقلية في تاريخ الجنس البشري، من غاليليو (Galileo) إلى نيوتن (Newton) إلى إينشتاين (Einstein) إلى الكشف الأخير عن أعمق التناظرات الموجودة في الطبيعة وأكثرها أصالةً.

التناظر في الرياضيات والفيزياء

قام علماء الرياضيات بتطوير طريقة منهجية خاصة لمقاربة موضوع التناظرات فكرياً، وتميَّزت هذه الطريقة بإمكانية استيعابها بسهولة نسبية في المراحل الأولى، إضافةً لكونها لا تخلو من المتعة عند الاستعمال. يُطلق على هذه الطريقة شبه السحرية اسم **نظرية الزمر** (Group Theory). ويُعطى قصب السبق في هذا الأمر إلى الرياضياتي الفرنسي إيفاريست غالوا (Evariste Galois) الذي عاش في القرن التاسع عشر حياةً قصيرة ومأسوية، وضع خلالها أسسَ طريقة التفكير المذكورة أعلاه.

كان غالوا ينتمي من الناحية السياسية إلى التيارات المتطرّفة، وحدث أن تورّط بعلاقة عاطفية عاصفة مع امرأة جميلة كانت مخطوبةً لرجل يُدعى بيشو ديربينفيل (Pescheux d'Herbinville). وكان ديربينفيل معروفاً بمهارته في الرماية، وعندما اكتشف وجود العلاقة الغرامية المذكورة، قام بتحدّي غالوا إلى مبارزة بالمسدسات[6]. وفي الليلة السابقة للمبارزة، ونظراً إلى معرفة غالوا بالسمعة التي يتمتّع بها خصمه في مجال الرماية، قام بطريقة محمومة

---

(6) السرد الممتاز عن نظرية الزمر وحياة غالوا (Galois) في كتاب: Simon Singh, *Fermat's Enigma: Problem: The Epic Quest to Solve the World's Greatest Mathematical,* Foreword by John Lynch (New York: Walker, 1997), pp. 223-226.

بكتابة بعض الملاحظات بخط يقارب الخربشة. تضمَّنت تلك الملاحظات تلخيصاً لأنماط مبتكرة من التحليل الرياضياتي تتعلق بالمعادلات الجبرية من الدرجات المتقدمة (وعلى وجه الخصوص المعادلات من الدرجة الخامسة)، حيث وضع طريقة لتحديد قابليتها للحلّ. وواقع الحال أن البنية الجبرية لنظرية الزمر كانت موجودة في لُبّ ذلك التحليل الرياضياتي. وبالعودة إلى مجرى الأحداث فإنه في صباح يوم 30 أيار/ مايو من عام 1832 سقط الشاب غالوا صريعاً بطلقة واحدة «على مسرح الدفاع عن الشرف»، وهو لا يزال في السنة الحادية والعشرين من عمره. وهناك من يزعم أن تلك المبارزة لم تكُن في الحقيقة سوى مؤامرة مدبَّرة لاغتيال غالوا بسبب تطرّفه السياسي. ومع كل هذا، فإنه لحسن الحظ وقعت ملاحظات غالوا - بعد حوالي أربعة عشر عاماً - في يد الرياضياتي الفرنسي البارز جوزيف ليوفيل (Joseph Liouville) الذي استطاع تمييز عبقرية الأفكار التي تتضمّنها وقيمتها الكبيرة، فقام بنشرها وتعريف العالَم بها.

إن نظرية الزمر هي اللغة الرياضياتية التي نستطيع بواسطتها التعامل مع مفهوم التناظر، ويمكن إظهار الأهمية الكبيرة لهذا المفهوم من خلال ذكر ما يبدو أنه يمتلكه من دورٍ أساسي في تكوين بنية الطبيعة نفسها[7]، فهو يتحكّم بالقوى التي نصادفها، وهو ينظِّم - حسبما نعتقد - المبادئ الكامنة خلف كل ديناميك الجسيمات الدقيقة الأولية. في الحقيقة يحتلّ مفهوم التناظر في الفيزياء الحديثة مكانةً

(7) يمكن للقرّاء المهتمّين بالمظاهر الرياضياتية الأساسية للتناظر أن يلجأوا لقراءة الملحق حيث عرضنا المفاهيم الرئيسية وأظهرنا بعضاً من النتائج «العجيبة» لنظرية الزمر. هذا العرضُ مناسبٌ بشكلٍ مثالي كمقدّمة لموضوع الزمر يتمّ إعطاؤها في دروس الجبر أو الفيزياء في مدرسة ثانوية، أو خلال حصّة تسلية ومنوّعات رياضياتية بُعَيد ظهيرة يوم أحد ماطر.

حاسمةً ربما تكون هي العظمى بين كل المفاهيم الأخرى، فمن المعروف في الوقت الراهن أن المبادئ التناظرية هي التي تملي قواعد القوانين الفيزيائية وتسيطر على بنية وديناميك المادة وتعرّف القوى الأساسية في الطبيعة. ممّا يعني أنّ الميّزات التي تتّصف بها الطبيعة يتمّ تحديدها في المستوى الأكثر جذريةً بواسطة مفهوم التناظر. إنّ المشهد العام للوضع كما نتصورّه الآن ـ والذي تمَّ تكوينه بشكلٍ تدريجي خاصةً في القرن العشرين ـ لم يصبح مكتملاً بعد، لكننا لو شبّهناه بأحجية تركيب القطع الصغيرة، فإنَّ ما في أيدينا من قطعٍ لتلك الأحجية يكفينا كي نعرف الدور الجوهري الذي يمتلكه مفهومِ التناظر فيها. إن هذا المفهوم المجرّد ـ هو وعلاقاته الوطيدة مع العالَم الفيزيائي ـ قد وُجد كي يبقى.

في وسط الجو الهائج لفيزياء القرن العشرين الجديدة، عاشت ـ بطريقة قريبة من التنسّك ونوعاً ما المأسوية ـ أعظم أنثى رياضياتية عرفها تاريخ البشرية، إنها إيمي نوثر. مارست نوثر عملها في ما كان يُعدّ في عصرها مركز العالَم الفكري وهو جامعة غوتينغن (Göttingen) في ألمانيا. وقد عملت هناك مع أكبر رياضياتيّ في عصرها وهو دايفد هيلبرت (David Hilbert)، وقامت من خلال عملها بالتأثير بشكل كبير على ألبرت إينشتاين (Albert Einstein). كانت نوثر الرائدة الأولى في ممارسة دورٍ أكاديمي في مجالٍ كان من المعتاد في ذلك العهد حرمان الإناث منه، لكنها في النهاية كانت شاهدة عيان على حدوث انهيار في الحضارة الأوربية، فقد استطاعت أن تتجاوز حواجز لم يكُن بالمستطاع تجاوزها من قبل كي تثبّت نفسها كمحاضِرة جامعية، لكن فقط ليتلوَ ذلك طردُها من الجامعة بسبب كونها يهودية الدين. اضطرت نوثر بعد هذا إلى توديع أصدقائها وأسرتها بحسرة، ولم يُتَح لها أن تراهم مرة أخرى أبداً، إذ

أمضت السنوات القليلة التي تبقّت من حياتها في جامعة برين ماور (Bryn Mawr) في بينسيلفانيا [في الولايات المتّحدة الأميركية].

خلال وجودها في غوتينغن، حازت نوثر على الشهرة بسبب أبحاثها حول البنى الأساسية للرياضيات، لكن أعمالها أدخلتها بشكل مؤقّت إلى مجال الفيزياء النظرية، وذلك كي تقوم ببرهان نظرية رياضياتية جديرة بشكل استثنائي بالاعتبار تناولت فيها الطبيعة. كانت نظرية نوثر عميقة للغاية، حتى إنه يمكن مقارنة تأثيراتها على تركيبة أذهاننا بتلك التي للنظرية المشهورة لفيثاغورس (Pythagoras)، فقد ربطت نظرية نوثر بشكل مباشر مفهومَ التناظر بالفيزياء والعكس بالعكس. وصاغت بذلك الهيكلَ العام لمفاهيمنا الحديثة عن الطبيعة، ووضعت لها القواعد المنهجية العلمية المعاصرة. لقد بيَّنت لنا بوضوح كيف تتحكَّم التناظراتُ بالعمليات الفيزيائية التي تحدّد صفات عالَمنا، فأعطت العلماء الضوء المنير الذي يرشدهم في محاولتهم إماطة اللثام عن أسرار الطبيعة، خاصةً وهم يحفرون وينقّبون في أكثر المستويات باطنيةً لنسيج المادة، حين يستكشفون أصغر منمنمات المكان وأقصر لحظات الزمان.

بهدف إنجاز المهمة المذكورة أعلاه، استخدم العلماء أقوى المجاهر التي استطاع البشر صنعها، وهي المسرِّعات الضخمة للجسيمات الدقيقة. من هذه المسرِّعات آلة التيفاترون (Tevatron) في مخبر فرمي (Fermilab) في باتافيا (Batavia) ـ إيللينوي (Illinois)، وكذلك المُصادم الهادروني الكبير (Large Hadron Collider) الذي هو قيد الإنشاء في جنيف ـ سويسرا. يقوم التيفاترون بتسريع البروتونات والبروتونات المضادة باتّجاهات متعاكسة في دائرة كبيرة، وذلك باستخدام طاقاتٍ تصل لتريليون إلكترون فولط، وهذا يشابه تطبيق بطارية تريليون فولط على أنبوب تفريغ. تتصادم هذه

الجسيمات بعد ذلك وجهاً لوجه، بل إنّ الكواركات والكواركات المضادة داخل البروتونات والبروتونات المضادة تتصادم بحدّ ذاتها. وبإعادة بناء الأنقاض الناجمة عن التصادم، يحصل الفيزيائيون على نوع من «الصورة الفوتوغرافية» لبنية المادة في مستوى صغير المسافات لم يسبق الوصول إليه من قبل. ولأخذ فكرة عن مدى صغر تلك المسافات، يمكن القول إن مقارنتها بكرة سلّة عادية تشابه مقارنة تلك الكرة بمدار الكوكب بلوتو! إن حوادث التصادم تلك تكشف عن المكوِّنات الأساسية للمادة وعن القوانين التحتية للفيزياء التي تتحكَّم بسلوكها. وقد وجدنا أن ذلك السلوك يتمّ تحديده وفق مفهوم التناظر.

نستطيع أن نلاحظ ـ عند دراسة الفيزياء على مستوى تلك المسافات الصغيرة جداً ـ أنّ قوى الطبيعة تبدأ بالاندماج مع بعضها لتتشارك في صفة واحدة عمومية، بينما تغيب هذه الظاهرة عن الأنظار في المستويات ذات الطاقة الأخفض أو عند «التضخيم». ولقد توصلنا في الأيام الحالية لإدراك أنّ اندماج القوى الأساسية هذا أو اتّحادها مع بعضها البعض في كينونة واحدة (توحيد القوى)، هو نتيجة لمبدأ تناظري منفرد يستبطنه بشكلٍ حذِق. هذا المبدأ البارع يُدعى **عدم تغيّر المعيار (اللاتغيُّر المعياري)** (Gauge Invariance). وقد استطاع العلماء متسلّحين بهذا المبدأ أن يضعوا توقّعاتهم عمّا كان عليه الكون في اللحظات الباكرة جداً من عمره، فمن بوتقة الكواركات والليبتونات وقوى المعيار الأساسية نشأ علم الكونيات المعاصر.

سمح لنا اكتشاف المبدأ التناظري التوحيدي لعدم تغيّر المعيار بأن نقفز نظرياً إلى مقاييسَ مسافاتٍ أصغر بألف تريليون مرة من تلك التي يمكننا مشاهدتها بواسطة أقوى مسرِّعات الجسيمات التي

بين أيدينا. وسمح لنا ذلك أيضاً بأن نتصوَّر ما كان عليه الكون ذاتُه في الجزء الأول من مليون مليار مليار جزء من الثانية. وفي مسافات على ذلك القدر من الضآلة، الذي يُقدَّر بـ 1/1,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000 من البوصة (أي واحد مقسوم بواحد يتلوه ثلاثة وثلاثون صفراً، أو ما يكافئ عند استخدام طريقة الترقيم العلمية الأكثر ملاءمةً 10^{-33})، فإنَّ الثقالة الكمومية تغدو فعّالة، ويتحطَّم الزمان والمكان، وتزول كل انطباعاتنا الاعتيادية عن معنى الحقيقة. هنا لابدّ من محاولة اللجوء إلى استخدام المبادئ التناظرية (والأفكار الرياضياتية ذات العلاقة بها، مثل **الطوبولوجيا** (Topology) التي تعنى بدراسة الأشكال والهيئات المحتمَلة للسطوح)، كي نستطيع نظرياً تخيّل إلى أين سيقودنا الاتّحاد الكامل لجميع القوى في النهاية.

قادت الأبحاث التي أجريت في المجال السابق إلى أفكار جديدة لافتة للنظر هي ما يُدعى **نظرية الأوتار الفائقة** (Superstring Theory)، مع المنظومة الرياضياتية الغامضة التي أنشِئَت فوقها المُسمَّاة **نظرية الـ م. (النظرية الأمّ)** (M-Theory)، التي لا يوجد أيّ شخص في الوقت الحالي يستطيع الادّعاء بفهمها بشكل كامل (ناهيك عن المعنى المقصود بحرف الميم نفسه). رغم هذا ربّما تكون تلك الأفكار هي أكثر منظومة منطقية مليئة بالتناظرات تمَّ تصوّرها من قبل العقل البشري، وهي تمثِّل أفضل فرضيّاتنا للوصول إلى ما يُسمّى نظرية كل شيء في العالَم الفيزيائي. بالمقابل ـ مثلما كان حال النظام الشمسي لبطليموس ـ قد تكون هذه المجهودات بانتظار تمييز التناظرات الحقيقية المتوارية عن الأبصار حالياً للطبيعة، عندما يقوم «كبلر» المستقبل بإزالة الستار عنها.

لفهم كيفية بزوغ أفكارنا عن مفهوم التناظر في العلم، دعونا

نعد إلى البدايات الأولى. لنُرجِع الساعة إلى الوراء، ولنتناول الوقت الذي كان فيه الكون يافعاً جداً، حين كان مظهره يقارب نوعاً من الفشل في الانبثاق (أو قنبلةً لم تنفجر): لم يكن فيه حينئذٍ أيّ مادة حقيقية، ولم يكن يبدو عليه أنه سيغدو أكثر من مجرَّد غمامات لا قيمة لها من غاز الهيدروجين. كيف انتقلنا من هذا الوضع إلى ما نحن عليه الآن؟

لنتفحَّص تاريخ الكون وتاريخ الكوكب الخاصّ بنا كما يفهمه العلم المعاصر في الوقت الراهن. لكن لنفعل ذلك من خلال «موشور ضوئي»: موشور الأساطير اليونانية القديمة، التي تعطينا لمحة خاطفة عن النضال الإنساني لإدراك مفهوم «أصل الأشياء». لننطلق من مرحلة متأخرة نسبياً من عمر الكون الباكر الموغل في القدم، مرحلة قريبة من عيد ميلاده الذي بلغ فيه سن العشرة ملايين عامّ. سنأخذ بعين الاعتبار جنباً إلى جنب كيفية نظر الأساطير وكيفية نظر العلم إلى منشأ وأصل كوكبنا الأرضي وكذلك أصولنا نحن البشر أيضاً.

إن القصص الأسطورية التي ألَّفها الناس بدلاً من الاستعانة بنفاذ البصيرة الذي تعطينا إياه الملاحظة العلمية، قامت بإلباس قوى الطبيعة مواصفاتٍ بشرية. بينما في الجهة الأخرى، كان التاريخ العلمي للكون عبارة عن تنبؤات استندت إلى عدد لا حصر له من التجارب والملاحظات والقياسات، استُخدمت فيها المرقابات [التلسكوبات] المتنوعة والمجاهر القوية (مثل مسرِّعات الجسيمات)، لتصل في النهاية لصياغتها من خلال لغة الرياضيات. سنلاحظ هنا نوعاً من الالتحام بين قوة الفيزياء وبين معالِم الشعر والتقاليد، حيث تتباين عنها أحياناً وتتماهى وتلتحم معها أحياناً أخرى، لتصنع في النهاية الطريقة المنهجية العصرية لفهم الأمور.

إنّ غايتنا من هذا الكتاب هي إظهار أنّ صورة المعرفة رغم

كونها في بعض نواحيها واضحة بشكل دقيق؛ بينما هي في بعضها الآخر مبهمة المظهر؛ بل لا تزال في مواضع معيّنة مغطّاة بستار من الأسرار الكثيفة، فإنها محكومةٌ ـ مع هذا كلّه ـ بمجموعة شاملة وثابتة من **قوانين الفيزياء** .صحيحٌ أن هذه القوانين ليست مفهومة بعد بشكل كامل، لكنها تبقى هي المتحكّمة وهي المسيطرة على كل التاريخ الرائع لكوننا ذاته. وهناك أدلّة علمية قوية ـ تمّ استقاؤها جزئياً من الوثائق الجيولوجية المتعلّقة بالمراحل الباكرة من عمر الأرض ـ على أنّ قوانين الفيزياء تتّصف بعدم التغيّر. إن القوانين الفيزيائية التي تسود اليوم هي نفسها التي سادت وتحكّمت بالكون في مراحله الباكرة جداً والموغلة في القدم. وهذه المجموعة غير المتغيّرة (أو الصامدة) من القوانين أخذت بنيانها من مبادئ تناظرية باطنية عميقة، وهي تقوم بعملها لتعبّر عن الجمال فائق الروعة للطبيعة.

تقدمة وإجلال إلى إيمي نوثر

أدّى عمل إيمي نوثر إلى تشابك فهمنا للطبيعة (عبر علمَي الفيزياء والرياضيات) مع بدائع الجمال والتناغم التي تحيط بنا من كل ناحية في الطبيعة وفي الموسيقى وفي الفنّ. ويحقّ لإيمي نوثر أن تفخر بكونها صاحبة إحدى أهمّ المساهمات في مجال المعرفة الإنسانية من خلال نظريتها فائقة الروعة. تربط هذه النظرية بشكل واضح وبالغ الأناقة بين مفهوم التناظر وبين الديناميك المعقّد للفيزياء، وتوفّر للفكر البشري القاعدة اللازمة لغزو العالم الداخلي للمادة عند الطاقات والمسافات الفائقة الحدّة. ويمكن للمرء أن يدافع بقوة عن الرأي القائل بأن نظرية نوثر ذات قيمةٍ في فهم القوانين الديناميكية للطبيعة مضاهيةٍ لقيمة نظرية فيثاغورس في فهم الهندسة.

في الواقع تزوّدنا نظرية نوثر بحجر الأساس لأي مقاربة توحّد

الفيزياء مع الرياضيات، كما تواجهنا مثلاً في محاولة تدريس المواضيع الشائكة لهذين العلمَين بطريقة لا يطغى فيها أحدهما على الآخر، فنفاذ بصيرتها يقدّم لنا مسلكاً نستطيع به بثّ روح جديدة لا في محاضرة وحيدة فحسب بل في منهاج تعليمي كاملٍ (لمرحلةٍ تدريسية متوسّطة) للفيزياء أو الرياضيات أو حتى بقية العلوم. وهي تفتح آفاقاً جديدة لمفاهيم الرياضيات وزمر التناظر، فتعيد بذلك كثيراً من الموضوعات الرياضياتية إلى مصاف العلوم لتتركها تتربع هناك بارتياحٍ تامّ.

إن المساهمات اللامعة التي قامت بها إيمي نوثر لها أيضاً فائدة لا يمكن نكرانها في مجال علم الاجتماع: فنحن هنا أمام امرأة عبقرية كانت على الأرجح أعظم رياضياتية أنثى في التاريخ. ورغم أن واقع الحال يظهر أنّ عدداً قليلاً للغاية من الطلاب - أو حتى من جميع أصناف البشر - سبق له السماع باسمها في كل حياته، فنحن هنا أمام نموذج يصلح لأن يكون مثالاً أعلى لكلّ امرأة بل لكلّ شخص سواء أكَان في نيَّته أن يصبح عالماً أم لا.

تشعر غالبية الفتيات الشابات في اليوم الأول لانخراطهنّ في دراسة مقرَّر فيزيائي لمدرسة ثانوية أو لكلية جامعية، كما لو أنّهن دخلن بالخطأ إلى غرفة تبديل ملابس خاصة بالرجال. لو تأمَّلنا طاقم أبطال علم الفيزياء: غاليليو، نيوتن، إينشتاين، هايزنبيرغ (Heisenberg)، شرودينغر (Schrödinger)، فيرمي (Fermi)، سنجد أن التوازن بين الجنسين مفقود بالمقارنة مثلاً مع طاقم آلهة جبال الأولمب(*) (Mount) أو شخصيات مسرحيات شكسبير أو الأوبرات الإيطالية. ولا يثير كثيراً من التعجّب كونُ عدد الفتيات اللواتي يتبعن

(*) أعلى جبال في اليونان، وهي موطن الآلهة الـ 12 في أساطير الإغريق.

هذا السلك بالذات هو عدد قليل لدرجة كبيرة. لكن الفيزياء يجب ألاّ تكون بمثابة نادٍ خاص بالرجال، أو «حمّام عمومي» لهم وهو الوصف الذي استعمله الرياضياتي البارز دايفد هيلبرت حين وقف بوجه زملائه الأعضاء في نفس الكلية وهم يتّخذون موقفاً معارضاً بعناد لمنح نوثر الترقية التي استحقّتها بجدارة إلى منصب الأستاذ، إذ إنه لا يوجد أيّ فارقٍ بين الجنسَين في المقدرة أو نفاذ البصيرة عند الناس الذين كرّسوا أنفسهَم بجدّ لمتابعة الأعمال الفكرية.

رغم ملاحظتنا للزيادة الواضحة في عدد النساء الشابات اللاتي يصبحن فيزيائيات في وقتنا الحاضر، فإن هذا العدد لا يزال صغيراً لدرجة غير معقولة. وبالرغم من النماذج الرائعة لإيمي نوثر وأمثالها كماري كوري (Marie Curie) وكاترين هيرشل (Catherine Herschel) وصوفي جيرمين (Sophie Germain) وغيرهن من النساء العظيمات في مجال العلم والرياضيات عبر التاريخ، فإننا نجد للأسف أنه في عام 2005 لا تزال النسوةُ ذوات تمثيل نسبي منخفض جداً في المجالات العلمية خاصةً الفيزياء والرياضيات، فالتحيّز ذو الخلفية الثقافية العميقة ضد المرأة لا يزال مستمراً بشكلٍ جليّ حتى في القرن الحادي والعشرين. ولابدّ من التأكيد على أنَ المجتمع العلمي لا يجوز أن يبقى فترةً أطول يتحمَّل أو يسمح بهذا التمثيل المنخفض والظالم لهذه المجموعة الموهوبة من دون أيّ شكّ.

إن المنظور الذي يقدّمه مفهوم التناظر يزوّدنا بعربة تمكّننا من إنعاش فيزياء القرون الماضية الغاليلية النيوتنية. كما يدلّنا على الاتجاه الصحيح ويعطينا خريطة طريق في ميدان التفكير المعاصر حول الطبيعة والنظريات الرائدة الطليعية: نسبية إينشتاين، وتوحيد جميع القوى في تناظر المعيار. إضافةً لأنه يحدّد لنا معالم الدرب إلى نظرية الأوتار الفائقة. لذلك لم نتردّ البتّة في تأليف كتاب مبسَّط حول

الفيزياء انطلاقاً من هذا المنظور. وعملنا هذا يتماشى مع أمانينا بأن نرى مقرّرات فيزيائية أفضل تُستخدَم لغرض التعليم في المدارس الثانوية وفي السنوات الأولى في الكليات.

إنّ العالَم الذي نعيش فيه هو عالَم معقّد لدرجة هائلة، ونحن جميعاً نواجه تحدّيات عاجلة وأكثر صعوبةً بكثير من السابق. وإنّ الأدوات التي يمكن أن نستعملها لحلّ مشاكل هذا العالم تتطلّب بحوثاً في العلوم الأساسية وتقنياتٍ متطوِّرة. وغالباً ما تكون المواضيع العلمية التي تستبطن الأمر السابق بعيدةً كثيراً عن متناول فهم عموم الناس. لذلك علينا أن نكافح بقوة كي نعاكس التدهور العام في الإدراك والمشاركة والاستيعاب المتعلق بالميادين التقنية للعلوم والهندسة والرياضيات. وإنه لأمر إجباري أن نحاول إعطاء أعضاء المجتمع غير المختصين بالعلوم ـ وهم الذين سيتّخذون القرارات النهائية عبر العملية الديمقراطية ـ فهماً أفضل عن المواضيع الرئيسة. ومستقبلنا في الواقع يتوقّف لحدّ كبير على ذلك.

كلمة أخيرة نذكرها هنا، هي أنّ حياة إيمي نوثر والمصاعب التي تحمّلتها كامرأة في ميدان العلم، يمكن أن تكون درساً أتى في الوقت المناسب، ليعلّمنا ضرورةَ التسامح والحاجةَ إلى التنوّع في مجتمعنا ونحن في طريقنا لملاحقة الحقائق.

الفصل الأول

أولاد الجبابرة

الجبابرة قُتلوا بصاعقة زيوس؛ لكن من رمادهم وُلد الإنسان

آرثر كوستلر (Arthur Koestler)

السائرون وهم نيام (*The Sleepwalkers*)

قصة تطوّر الكون والاستعارات المجازية لها

بعد عشرة ملايين سنة من الانفجار العظيم، كان الكون ممتلئاً بغمامة أو غشاوة منتشرة من الجسيمات الدقيقة. وكان ما يشبه الضباب الرقيق يتخلّل أرجاء المكان محتوياً أخفَّ العناصر الذرية، فغالبيته كانت من الهيدروجين مع كمية قليلة من غاز الهليوم. كما كانت هناك عدة أنواع من الجسيمات الأولية تتجوَّل بشكل حرّ عبر المكان كآثار متبقّية من اللحظة الهائلة التي حدث فيها الخلق. كان الكون مظلماً وكان يبرد شيئاً فشيئاً، فلم يكن ينيره سوى وهج ضعيف من الأشعة تحت الحمراء بقيت كرفاتٍ للانفجار العظيم، وهج يشبه ما نراه منبعثاً من رماد نارٍ منطفئة وهو يبرد بالتدريج[1].

(1) للاطّلاع على مقدّمة لنظرية الانفجار العظيم ستبقى خالدةً، انظر كتاب: Steven =

لقد كان الكون في عيد ميلاده ذي العشرة ملايين عام يبدو كأنه في طور الاحتضار.

لم تكن في الكون حينئذٍ أي مادة يمكن أن تُصنَع منها أجسام صلبة. وكان يبدو أنه لن تتواجد أبداً **الأشياء** من أمثال صدفات البحر أو الأشجار أو جبال الثلج أو تماثيل **النبي داوود** (David) أو الطرق السريعة أو أوتار القيثارة أو الريش أو الأدمغة أو الأدوات الحجرية أو الورق اللازم لتأليف كانتاتا(*) أصيلة لباخ. في الواقع لم يكُن بالإمكان وجود أيّ صخور أو رمال أو مياه أو غلاف جوي قابل للتنفّس، فما بالُكَ بكوكب كامل، فلم يكن بالمستطاع تشكُّل أيّ شيء صلب من الغازات المنتشرة والمنتثرة أو من الجسيمات الأولية سريعة الزوال، التي كانت تتسكع وهي معزولة ضمن أصقاع الكون فائقة الاتّساع. بعد 10 ملايين سنة، هذه الفترة التي تُعتبر قصيرة جداً بالنسبة إلى عمر كوكب، أو حتى قصيرة بالنسبة إلى الطول الكامل لحياة بعض أنواع الأحياء على الأرض، كان الكون لا يزال بلا شكل محدّد بارداً مظلماً، وكان يبدو ظاهرياً أنه آخذ بالتلاشي.

لأسبابٍ لاتزال حتى الآن غير مفهومة بشكل كامل، وربّما تكون لها علاقة بواحدٍ من الأنواع الغامضة غير المعروفة بعد من الجسيمات الأولية التي كانت موجودة في الضباب البدائي، حدث **شيء ما** بعد ذلك. قد لا يكون أكثر من مجرّد تشكّل تكتّلات صغيرة من الجسيمات، تحرَّضت واهتاجت بفعل حركة كمومية، فبدأت بتكوين بذور صغيرة بدائية من البنية، مثلما تؤدي حبيبات الغبار الناعمة إلى تكاثف بخار الماء في قطرات من المطر تهطل فوق

Weinberg, *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe* = (New York: Basic Books, 1977).

(*) قصة تتمّ روايتها غناءً بمصاحبة الموسيقى.

سهول كانساس(*). المهم أن ما حدث كان كافياً لكي تبدأ الثقالة عملها. وبتأثير القوة الهائلة والتي لا يمكن إيقافها للثقالة، بدأت أقسام من الغشاوة المعمّمة تتهاوى لتشكّل ما يشبه غمامات عملاقة. وأخذت سُحُب الهيدروجين الكبيرة تدور مهتاجة بشكل دوامات تشبه ما يحدث في العواصف المصحوبة برعود هائلة. ومع تزايد واشتداد العملية السابقة التي ظلّت تغذّيها وتعزّزها قوى الثقالة، حدث خلال بضع مئاتٍ من ملايين السنين تحويلٌ كامل للغشاوة المعمّمة الأولى التي كانت معدومة الشكل، فقد شرعت بالتألّق واللمعان مجرّاتٌ ابتدائية كبيرة لها شكل شبيه بالقطرات وتحتوي على مليارات النجوم الفتية وإن كانت مازالت واهنة. لقد بدأ الكون عصر الازدهار.

كانت تلك النجوم الأولى هي آباء وأجداد كلّ الأشياء التي قدِّر لها أن تظهر لاحقاً. كان بعضها بالكادّ أكثر من «طابات» ليّنة ضخمة من غاز الهيدروجين الساخن تعطي بصعوبة وهجاً خافتاً. بينما أصبح غيرها نجوماً فائقة بشكل كرات برّاقة هائلة الحجم أكثر ضخامةً بمئات المرات من الشمس، كانت تتألّق بإشعاعاتٍ زرقاء وهي تلتهم بشراهة وقودها البدائي المؤلّف من الهيدروجين والهليوم. وعميقاً في باطن لبّ هذه النجوم الجبّارة، بدأت الذرات الأثقل بالتشكّل، حيث بُنيت انطلاقاً من الوقود الهيدروجيني الهليومي من خلال عملية الاندماج النووي.

تعزِّز الدرجات المفرطة من الضغط والحرارة في أعماق باطن النجوم عمليةَ الاندماج النووي. ويؤدّي اتّحاد النوى الذرية أو التحامها مع بعضها البعض إلى تشكيل نوى ذرية أثقل، فعند كبس نواتي هليوم مع بعضهما تتكوَّن نواة بيريليوم، وبإضافة نواة هليوم

(*) ولاية في الولايات المتحدة الأميركية.

أخرى يتمّ خلق نواة كربون، وبجمع نواة كربون مع نواة هليوم جديدة تنتج نواة أوكسجين، وهلمَّ جراً. وتزوِّد هذه العملية النجومَ بالطاقة ممّا يجعلها تتألقّ بشكل لامع، مصدرةً إشعاعاتٍ قويةً من الضوء في خلاء الكون المظلم.

تسير عملية الاندماج النووي قدماً إلى الأمام مكوِّنةً ذرّاتٍ أثقلَ فأثقل ضمن الفرن النووي لباطن النجوم، حتى تصل إلى عنصر الحديد. إنّ نواة الحديد هي أكثر النوى الذرية استقراراً، ومن ثم فهي - مع نوى العناصر الأكثر وزناً - تتوقَّف عن إنتاج الطاقة عبر الاندماج مع نوى ذرية أخرى. إن الوصول إلى الحديد هو إشارة إلى نهاية الوقود المتوفّر لأيّ نجم، وبالنتيجة دلالة على بلوغ ذلك النجم لنهاية حياته. وعند استنفاد النجوم الصغيرة لوقودها الاندماجي، فإنها ببساطة تتوقَّف عن اللمعان، وتنكمش إلى عوالم باردة ميتة، فتدخل في سبات أبدي وغير مرئي ضمن المجرّة. أما النجوم الفائقة فينتظرها مصير أكثر إثارةً وعنفاً من ذلك بدرجة بعيدة.

الجبابرة(*)

تسعى كل الحضارات إلى فهم ماهية القوى والقواعد والقوانين الرائعة التي تحكّمت بمجموعة الحوادث التي من خلالها تمَّ تجسُّد العالَم الفيزيائي. مَن وما هي الشرائع التي أدَّت إلى خلق مجمل الكون؟ بأيّ لغة يجب أن تُروى الحكاية؟ هل سنستطيع في يومٍ من الأيام أن نصل للإجابة عن كل الأسئلة؟

(*) الجبابرة (Titans) في أساطير الإغريق هم آلهة قوية - يرتبط بعضها مباشرةً بظواهر طبيعية أساسية مثل الشمس والقمر والأرض - حكمت خلال العصر الذهبي، وعندما غدت «مسنّة» أطاحت بها آلهة أكثر شباباً هي آلهة جبال الأولمب (Olympians) بقيادة الإله زيوس خلال حرب الجبابرة.

حاول البشر من خلال الاستدلال المنطقي أن يستنتجوا القصة التاريخية لتطوّر الكون من الانفجار الأول إلى تشكيل المجرّات التي تحتوي على المليارات من عناقيد وتجمّعات النجوم المتألّقة في الظلام الدامس، مع العلم أن البشر أنفسهم هم نتاج قصة أخرى مختلفة تماماً من التطوّر، حدثت على سطح كوكب فريد من نوعه وإن كان يدور حول نجم نموذجي كجزء من مجرّة عادية. بالطبع هذه هي وجهة نظر العلم بخصوص الموضوع، لكنه أمر ملهم للأذهان الدرس الذي نستخلصه من خلال التمعّن في **تطوّر فكرة الخلق** لإدراك كيفية نمو الفكر الإنساني، فنحن نجد بذوراً للمفاهيم الحديثة لعلم الكونيات المعاصر حتى في الأساطير الوثنية للزمن الغابر كتلك التي للبابليين والمصريين واليونانيين القدماء. ومن تلك الأساطير نستطيع أن نسبر أغوار الأساليب التي حاول بها الدماغ البشري الباكر أن يستخدم العقلانية كي يمسك بتلابيب الأحجية المنطقية العميقة التي يطرحها عليه وجود الكون.

لقد قمنا في الوقت الحاضر بتنظيم فهمنا ومعارفنا المتعلّقة بقواعد الطبيعة، وقمنا بتسمية النتيجة باسم **قوانين الفيزياء**. أما اللغة التي نستخدمها لمقاربة قوانين الطبيعة هذه فهي الرياضيات. نحن نقرّ أن فهمنا لتلك القوانين لا يزال غير كامل، لكننا بنفس الوقت نعرف كيفية التقدّم والارتقاء لتوسيع معارفنا في هذا الميدان باتّباع ما يُدعى «المنهج العلمي»: إنه عملية منطقية تتضمّن الملاحظة والارتباط السببي بهدف استخلاص البيانات الصحيحة التي نحصل عليها من خبرتنا الحياتية التجريبية بخصوص الطبيعة. ما أشرنا إليه بكلمة «عملية منطقية» يكون في الغالب مشوباً بالشكّ وعدم التأكّد، ملاحَقاً بالتشويش والفوضى، متعثراً بالأخطاء والهفوات، مُعاقاً من قبل البيروقراطية، ومحبَطاً بسبب الأنانية والغرور الشخصي؛ لكن على

المدى الطويل فإن عمل المنطق هو الذي ينتصر في النهاية. ولذلك يكافح العلماء للوصول إلى تحديد القوانين الثابتة والراسخة للطبيعة. ولابدّ هنا من لفت النظر إلى الاعتقاد السائد بيننا اليوم عن أن قوانين الفيزياء المعتمَدة تتخلّل جنبات الكون بشكل كامل، بحيث إن نفس القوانين التي سادت لحظة الخلق هي التي تتواجد حالياً. هذا الاعتقاد يبقى رغم كل شيء عبارة عن فرضية علمية، ظل العلماء ولا يزالون يسعون لإيجاد إثباتاتٍ لها عن طريق الملاحظة.

بطريقة مشابهة لما سبق ذكره، سعت شعوب التاريخ القديم إلى وضع نظام من القواعد الثابتة التي تعلِّل وجهة نظرها بخصوص الخلق. وقد بُنيَت كذلك مفاهيم القدماء عن القوى والقوانين التي تتحكّم بالخلق على ملاحظاتهم التجريبية المستقاة من العالَم المحيط بهم. لكن القواعد التي وضعوها كانت في الحقيقة «قوانين» للطبيعة البشرية و«قواعد» للعواطف الإنسانية، وضمن ذلك تدخل نقاط الضعف السلوكية الخاصة بالجنس البشري. لقد تمَّ إسقاط تلك الميّزات السلوكية على الآلهة أي ما اعتبروهم المحرّكين الأصليين للكون. وبدلاً عن اللغة التجريدية للرياضيات، كانت لغة القدماء في تعبيرهم عن أفكارهم هي الشعر.

يمكن اعتبار الجبابرة في أسطورة الخلق الوثنية لقدامى اليونانيين بطريقةٍ ما ـ وإذا استعملنا الاستعارات المجازية ـ هم ما يقابل النجوم الضخمة الأولى التي تشكّلت في كوننا: النجوم التي أصبحت في النهاية مستسعرات حرارية فائقة (سوبرنوفات (Supernovas)). كان الجبابرة هم الجيل الأول الغامض من الآلهة الذي دُعي باسم «الآلهة المسنّة»، وهي الآلهة التي شكلت آباء وأجداد الآلهة اللاحقة لجبال الأولمب (Mount Olympus). وفي هذه الرواية يوجد العديد من الآلهة الذين هم في الواقع تشخيصٌ

لمجال واسع من الصفات البشرية. ومن هنا نجد أن القصة حافلة بالفجور والحب والشبق وسفاح القربى والسلب والنهب ومشاعر الاستياء والحسد والغيرة وكذلك العنف وكلّ الأمور الأخرى التي نجدها في أوبرا من القرن التاسع عشر. لكننا نجد أيضاً في تلك القصة نوعاً من المنطق الفريد يشابه ما نلاحظه في مقاربة العلم المعاصر لقضية الخلق.

وفق الأسطورة اليونانية، وُجدت الفوضى كاوس (Chaos) قبل الجبابرة. وفي زمن هوميروس (Homer) (القرن الثامن قبل الميلاد) كتب الشاعر هزيود (Hesiod) في مؤلَّفه عن سلسلة نسَب الآلهة (ثيوغونيا) (Theogony)، أنّ الإلهة غايا (أي الأرض) انبثقت بشكل عفوي من الفوضى كاوس، وهي التي ولدت أورانوس (Ouranos) (أي السماء (Uranus) في اللاتينية). وقد تمَّ توارث الإلهة غايا كإلهة «الأرض ـ الأم» التي كانت تُعبَد في زمن ما قبل التاريخ من قبل أسلاف الغربيين من الجماعات القبلية ما قبل بزوغ الحضارة الهيلينيستية:

لاشكّ أن كاوس كانت بوجودها هي الأولى،

وبعدها أتت غايا (الأرض) ذات النهود العريضة،

ومن هنا أخذ الخالدون أساساتهم الأكيدة الأبدية،

الخالدون الذين يرفعون القمم الثلجية لجبال الأولمب،

ومعهم تارتاروس (Tartarus) (الجحيم) ذو الظلام الدامس،

الكامن في أعماق غايا ذات الطرق الواسعة،

وكذلك إيروس (Eros) (الحب) الأكثر جمالاً بين كل الآلهة الخالدة،

إيروس الذي يهيّج ويثير الأطراف،

ويقهر عقول وحكمة كل الآلهة وكل البشر الذين بينهم.

من كاوس أتى إيريبوس (Erebus) (الكآبة) ونايت (Night) (الليل) السوداء؛

لكن نايت هي التي ولدت داي (Day) (النهار) والأثير (Aether)،

اللذين حبلت بهما بعد اتّحادها بالحب مع إيريبوس.

أما غايا فقد حملت أولاً بأورانوس (السماء) المساوي لأمه نفسها،

كي يغطّيها في كل النواحي،

وليكون مكان الإقامة الأبدية للآلهة المباركين.

وغايا هي التي أتت منها التلال الطوال،

المثوى المليء بالنعمة للحوريات الإلهية،

اللواتي وسط وديان تلك التلال كان سكنهن.

كذلك حملت غايا ببونتوس (Pontus) العميق والعقيم،

المتورّم بشكل وحشي،

دون أن تتحدّ مع أحد بعمل غرامي حلو المذاق.

لكن بعد ذلك اضطجعت غايا مع ابنها أورانوس،

وحملت بأوشانوس (Oceanus) (البحر المحيط) ذي الدوامات العميقة،

وكوياس (Coes) وكريوس (Crius) وهايبريون (Hyperion) وإيابيتوس (Iapetus)،

وثيا (Theia) وريا (Rhea)،

وثيميس (Themis) ومنيموسين (Mnemosyne) وفويب (Phoebe) ذي التاج الذهبي وتيثيس (Tethys) الجميل.

وبعدهم وُلد كرونوس (Cronos) الماكر،

أصغر أولادها وأكثرهم فظاعةً،

الذي كان يكره أباه الشهواني.

وهكذا تزاوجت غايا زواج سفاح مع ابنها الأول أورانوس، الذي أطلق بفخر على ذريته من ذلك الزواج اسم الجبابرة، لأنهم كانوا يتّصفون بحجم هائل وبقوة لا تُصدَّق. وتضمَّنت قائمة أشهر الجبابرة في مجموعة القصص الأسطورية كلاً من كرونوس (وهو ما يقابل زحل أو ساتورن (Saturn) عند الرومان) والد زيوس (Zeus)؛ وأوشانوس (البحر المحيط)؛ ومنيموسين (Mnemosyne) (الذاكرة)؛ وتيهيميس (Tehemis) (العدالة)؛ وإيابيتوس (Iapetus) الذي قام ابنه أطلس (Atlas) بحمل العالَم على كتفيه. كان بروميثيوس (Prometheus) من الجبابرة أيضاً وهو الذي سرق النار من الآلهة كي ينقذ العرق البشري، وكان مصدر إلهام للبشر في محاولتهم لفهم واستيعاب الكون. تمَّ إعطاء العالم السفلّي صفة الأشخاص في شعر هزيود بواسطة تارتاروس، وهو مكان مظلم كئيب بغيض ووعر المسالك مثَّل الجحيم الأصلي، وكان مُحاطاً بسورٍ حديدي عظيم، فقد كان السجن النهائي لكلّ من يصل إليه، وكانت بواباته محروسة بواسطة أكثر مخلوقات الكون بشاعةً وشناعة. كان تارتاروس يُعتبَر موجوداً «تحت كل الأشياء»، ورغم ذلك كان بالإمكان الوصول إلى بواباته عن طريق القفز داخل فوهة بركان والاستمرار في السقوط لمدة تسعة أيام. كان الجبابرة هم آباء الآلهة الذين حكموا العالَم في

النهاية من مقرّهم في جبال الأولمب. وكلّ شيء آخر كان حسب الأساطير اليونانية من سلالة أولئك الجبابرة[2].

---

(2) Hesiod, *Theogony*, Translated, with an Introd., by Norman O. Brown (New York: Liberal Arts Press, [1953]), ll. 116-138.

تقدّم المكتبةُ الإلكترونية لبيركلي [جامعة في ولاية كاليفورنيا في الولايات المتحدة] عن العصور الوسطى والكلاسيكية (Berkeley Online Medieval & Classical Library) ترجمةً وتحليلاً على الموقع: www.sunsite.berkeley.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 10 أيار/ مايو 2004). لقد أغفلنا عند المناقشة في النصّ الرئيسي القصةَ التفصيلية لل**ثيوغونيا** التي نوجزها في ما يلي:

وَلدت غايا (Gaia) السايكلوبات (Cyclopes) (ويعني مفردها باليونانية «مكوّر العينين»)، وهي وحوشٌ ضخمة بعينٍ واحدة، سُمّيَت برونتس (Brontes) وستيروبس (Steropes) وآرجيس (Arges)، ومثّلت على الترتيب **الرعدَ** و**البرقَ** و**الصاعقة البرقية** (في آخر المطاف انتهى بهم الأمر بأن يكونوا كلّهم في جبال الأولمب، ليصبحوا الحدّادين الذين يصنعون أسلحة زوس). حمل البطنُ الثالث لغايا الهيكاتونتشيرات (Hecatoncheires) وأسماؤها إيغايون (Aegaeon) وكوتس (Cottus) وجيجيس (Gyges)، وهي وحوشٌ ضخمة بخمسين رأساً ومئة ذراع، يتمتّع كلّ منها بقوةٍ هائلة. وجد أورانوس (Ouranos) أنّ الهيكاتونتشيرات كريهة وقبيحة جداً ـ وهذا انتقاصٌ من مكانته الأبويّة- لذلك أخفاهم بعيداً «في مكانٍ سريّ من الأرض»، ممّا سبّب الحزن لوالدتهم غايا.

أقنعت غايا ـ الغاضبة بسبب قضية الهيكاتونتشيرات ـ ولدَها كرونوس (Cronus) الجبّار (Titan) بأن يطيح بوالده أورانوس. لذا ينصب كرونوس كميناً لوالده، ثم يُخصيه بواسطة منجل، ويصير حاكماً للجبابرة. يتمّ رمي الأعضاء الحيوية لأورانوس في البحر، لتغدو زبد البحر الذي تنشأ منه إلهة الجمال أفروديت (Aphrodite) فينوس (Venus). ويُسمَح للهيكاتونتشيرات بأن تغادر سجنها وتظهر من جديد.

ولكنّ كرونوس كان حاكماً مريضاً بالشكّ والخوف. ومن أجل تجنّب أيّ اغتصابٍ ممكن في المستقبل لسلطته من قبل ذرّيّته، فقد اعتاد على التهام أطفاله هو بنفسه. ومع ذلك استطاعت زوجته ريا أن تحتال عليه، فجعلته يلتهم صخرةً بدلاً من ابنه زيوس وقاطني الأولمب ـ الذين سيصبحون في المستقبل آلهةَ اليونان الهيلنستية ـ وبالتالي نجحت في إنقاذهم. في أحد أعماله الأولى التي كانت ناجمة عن منافسة الإخوة والأقرباء رمى كرونوس بأولاد غايا القبيحين ـ السايكلوبات و الهيكاتونتشيرات ـ نحو الأسفل إلى عالَم الجحيم تارتاروس. وبذلك لم تُفِد الإطاحةُ بأورانوس قضيةَ غايا ومرامَها، وصارت الهيكاتونتشيرات المتوحّشة ـ النسل اللاحق لغايا ـ تحرس تارتاروس.

وفي نهاية الأمر يثور زيوس على أبيه كرونوس وعلى الجبابرة الآخرين، ويتمّ طرح جميع =

إذا قبلنا بتعريض أنفسنا لنوع من التعذيب المثير، فإننا يمكن أن نتصوَّر بعض التقابلات المتوازية بين الأسطورة القديمة التي ذكرناها وبين مقاربتنا العلمية للموضوع، رغم أن هزيود لم يتسنَّ له بالطبع أن يطّلع على هذه الأخيرة، فعلى سبيل المثال، الأخ المظلم لغايا أي تارتاروس يمكن أن يمثّل الثقوب السوداء العملاقة التي نعتقد اليوم بوجودها في مراكز العديد من المجرّات، والتي تشكّلت من انسحاق غمامة الغاز البدائية على نفسها الذي أنتج البنى الأولى في الكون. كذلك يمكن تشبيه الرحلة إلى الأسفل عبر البركان إلى تارتاروس بالوصف الشعري للرحلة ذات الاتجاه الواحد لمسافر غير محظوظ عبر الفضاء، إذا ما سقط ضمن **أفق الحادثة** (Event Horizon) أي اجتاز حدود ثقب أسود عملاق، فامتنع عليه إلى الأبد الرجوع إلى كونه وإلى منزله مرة أخرى، فالاحتباس داخل الثقب الأسود عندما يعبر الشخص أفق الحادثة هو بالفعل أبدي الديمومة، أكثر بكثير مما تفرضه أي بوابات حديدية حتى لو كانت محروسة بأكثر الوحوش ضراوةً وبشاعة. وهناك تسود ظروف يُعاد فيها ترتيب وتسوية الزمان والمكان، بحيث إن الضوء نفسه يعجز عن العودة للبزوغ.

كانت حقبة هزيود تماثل زمن النهضة الأوروبية الباكرة من حيث إنها فترة ازدهار أدبي، لكنها ذات صلة هنا بما يُدعى العصر البطولي للحضارة اليونانية. وكما حدث بعد عصر النهضة، تلت تلك الحقبة

= الجبابرة في تارتاروس. لكنّ كرونوس ينجح في الفرار والإقامة في إيطاليا، حيث يحكم بصفته إله الرومان ساتورن (Saturn) (زُحل)، ويقال إنّ عصرَ حكمه هذا كان عصراً ذهبياً على الأرض، لذا يتمّ تكريمه وتبجيله ضمن التقليد الروماني بِعيدِ الإله زحل (ساتورناليا (Saturnalia)). أمّا زيوس فإنّ عهد حكمه مع ذريته من بعده هو الذي يتلو عصرَ الجبابرةِ، وذلك انطلاقاً من جبال الأولمب.

في تاريخ اليونانيين حقبةٌ أخرى أكثر اتّصافاً بالتحليل وبالعقلانية، فكانت بحقّ «تنويرية» إذ كان من نتاجها تطوّر الرياضيات. حدث هذا في اليونان القديمة مع نهوض مدرسة أعظم الرياضياتيين في القرن السادس قبل الميلاد، فيثاغورس. وقد تمَّ ذلك في مرحلة استثنائية بكل معنى الكلمة من تاريخ البشرية، حيث توصَّل العقل البشري «المصقول» لأول مرة إلى إدراك أن الرياضيات قادرة على توصيف العالَم الفيزيائي.

مع الحصول على الوسيلة الجديدة وهي الهندسة في حوزتهم، قام الفلاسفة الفيثاغوريون بمحاولة معالجة أسئلة ذات علاقة ببنية الكون. لقد سألوا أنفسهم: إذا أخذنا بعين الاعتبار النظام المنطقي الموجود في الرياضيات، فكيف يمكننا تناول كلّ الكون مع بعضه البعض بحيث يتوافق مع ذلك النظام المنطقي؟ ماذا سيكون شكله؟ كيف تتحرك مكوِّناته؟ ما هو التركيب (الذري؟) لجميع المواد؟ هل تقع الأرض في مركز الكون، وإذا كانت كذلك فكيف نجعل هذا الأمر منسجماً مع الحركات الملحوظة للكواكب في السماء؟ وقد كامل اليونانيون بعد ذلك بين الهندسة والمنطق وحسّنوا طرقَ المعالجة ليضعوا نظريات علمية مفصَّلة حول معظم الظواهر الطبيعية، التي تضمَّنت ظاهرة المدّ (والجزر) ومظاهر الطقس ومنشأ وتطوّر أنواع الأحياء وكذلك الطبّ والمادة والفضاء الكوني.

بلغ ذلك التنوير الفكري المتميّز ذروته بصمت حوالي عام 310 قبل الميلاد مع إنجاز تحفة علمية نظرية من قبل الفيلسوف الرائع أريستاركوس (Aristarchus)، فاستناداً لنظرية عن المنظومة الشمسية تعتمد الشمس مركزاً اقترحها قبله سلَفُه هيراقليطس (Herakleides)، قام أريستاركوس بتوسيع تلك النظرية ليصف بطريقة صائبة الشكلَ الصحيحَ لمدار الأرض ومدارات بقية الكواكب التي تحيط بالشمس،

وكذلك مدار القمر الذي يطوِّق الأرض. لقد ضاع ذلك العمل للأسف، لكن رغم هذا فإننا عرفنا بوجوده من خلال الوصف الذي وصلنا من العالم اليوناني أرخميدس (Archimedes) ومن فيلسوف الحقبة الرومانية بلوتارك (Plutarch). ويمكن أن يُعتَبر العمل السابق رمزياً هو موجة المدّ العالي للفلسفة العلمية اليونانية التي وصلت به إلى نهاية عصرها الذهبي، حيث لم يكُن يفصلها حينئذٍ سوى خطوة واحدة فحسب عن كوبرنيكوس (Copernicus) وكبلر (Kepler) وغاليليو[3] (Galileo).

كانت فرضية مركزية الشمس يُنظَر إليها من قبل البعض على أنها غريبة أو مثيرة للسخرية، ولم يتمّ قبولها على الإطلاق من قبل الفلاسفة اليونانيين اللاحقين. (وهكذا كان على هذا المفتاح الأساسي لفكّ طلاسم قوانين الفيزياء أن ينتظر إعادة اكتشافه من جديد من قبل كوبرنيكوس وكبلر بعد مرور ما يقارب ألفيَّتين من السنوات). في تلك المرحلة اللاحقة تغيَّرت طبيعة الفلسفة نفسها، فتدهورت مكانة الرياضيات والمذهب العقلي العلمي، ودخل المجتمع في فترة جيشان قادت إلى عصر أفلاطون (Plato) وأرسطو (Aristotle). كانت الصورة الكلّية عن بنية الكون عند هذين الفيلسوفين خاطئة تماماً، وهي التي قادت في نهاية الأمر إلى القبول الواسع لمفاهيم مغلوطة عن الفيزياء وعن الظواهر الطبيعية. وتمَّ أخيراً اعتبار ذلك بمثابة تشريعات مقدّسة في عقائد الكنيسة الكاثوليكية صاحبة السلطة.

على الرغم من الإنجازات الملحوظة خلال فترة الفيثاغوريين،

---

(3) Arthur Koestler, *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*, With an Introduction by Herbert Butterfield (London; New York: Arkana, 1959), p. 35.

فإن الفهم التفصيلي لموضوع **الأصل** الشمولي للكون لم يتقدَّم إلاّ مقداراً صغيراً أكثر من الاستعارات المجازية الشعرية التي لدى هزيود مثلاً. مع الأخذ بعين الاعتبار بأنّ الملاحظات العلمية ذات المغزى الحقيقي لأعماق الفضاء لم تكُن متوفّرة بالطبع في ذلك العهد. ومما هو جدير بلفت النظر إليه رغم كل شيء، أنّ أسطورة الخلق الوثنية قامت بوضع حلّ للمسألة المنطقية بخصوص الخلق: ويا للعجَب، لقد كان جوابها صحيحاً! فقد تبنَّت الفكرة الصائبة عن حادثة خلق فائقة العنف **متفرّدة ووحيدة**، كانت في منظورها حادثة انبثاق الكون من الفوضى كاوس (وهي تعبير غير دقيق عن اللاشيء)، وهذا شبيه في ملامحه العامة بنظريتنا المعاصرة عن الانفجار العظيم.

كيف يمكن أن يكون هناك هذا التوازي المدهش بين أسطورة من غابر الأزمان وبين نظرية علمية معاصرة حول الخلق؟ في الحقيقة لا توجد عندنا في هذا الموضوع خيارات عديدة، فأيّ قصة للخلق هي بالأساس حلّ لأحجية منطقية. إمّا أن يكون الكون موجوداً على الدوام هنا، وفي هذه الحالة يصبح السؤال عن الخلق موضعاً للمناقشة والجدال. وإمّا أن يكون الكون قد خُلِق في ما يمكن اعتباره لحظة زمنية استثنائية مميَّزة. وهناك إمكانية ثالثة، ربّما تكون وجهة نظرها شبيهة بما تطرحه الزن(*) (Zen)، وهي أنّ الحقيقة عبارة عن انخداع وأنّ الكون كما نعرفه لم يُخلَق أبداً بطريقة ذات مغزى، ممّا قد يجعل السؤال السابق نفسه بلا أيّ معنى. حلَّت أسطورةُ الخلقِ اليونانيةِ الأحجيةَ بالتأكيد على حادثة الخلق الفردية الوحيدة، ممّا وضعها مباشرةً بمواجهة مهمة «تفسير» هذه الحادثة الاستثنائية الفريدة. وكانت تفسيرات القدماء أيضاً محاولة لفهم عمليات الخلق التفصيلية

(*) شكل من أشكال البوذية الماهايانية يؤكّد على أهمية التأمّل والحدس.

والعنيفة من خلال «قوانين الطبيعة» التحتية المستبطنة لها، مع أن تلك القوانين كانت في واقع الأمر تعني في حالتهم قوانينَ العواطف الإنسانية التي ظهرت في الأمزجة العاصفة للآلهة وفي السلوك الهمجي لها، فصوَّرت لنا القصةُ الناتجة غالبية الخصائص والميزات البشرية، الخيّرة منها والشريرة. وقاد التسلسل المنطقي لمآل الأمور فيها أخيراً إلى كوكب الأرض الذي نسكن عليه اليوم.

لم يصل العلم المعاصر إلاّ في الأربعين سنة الأخيرة تقريباً إلى إجماع على فكرة وجود لحظة ابتدائية للخلق أي على ما يُدعى بالانفجار العظيم. وبينما بدأت أسطورة هزيود من قمة الجبل، وسارت في لوحتها الشعرية من الأعلى نحو الأسفل؛ كان على العلم بالمقابل ـ باتّباع المنهج العلمي ـ أن يقوم بتسلّق الجبل عبر مسالك شديدة الانحدار، فلا يحقِّق النجاح في النهاية إلاّ من خلال تاريخ طويل ومعذِّب من اكتشافات المُجدِّين ومن التحليل المعمَّق وتفنيد الأخطاء. لم يكُن الوصول إلى هناك سهلاً أبداً، واستلزم الاستيعابَ التفصيلي لنتائج الملاحظات والعمليات الأساسية. كانت بعض الاكتشافات مثل ملاحظة إشعاع الخلفية الكوني ذي الدرجات الثلاثة فقط على سلم كالفن (وهو الإشعاع الكهرمغناطيسي المتبقّي اليوم من الانفجار العظيم) من ضمن الدلائل العلمية المباشرة التي أكَّدت النظرية، وقد تعزَّزت أكثر الصورةُ التفصيلية التي لدينا عَما حدث بواسطة العديد من الاكتشافات الحديثة ذات القيمة. ولكن يجب ألاّ يغيب عن بالنا أن تلك الصورة التي لدينا عن خلق الكون تستند إلى **جميع** الاكتشافات التي تمَّت في علم الفيزياء. وفي الواقع ربّما نكون قد تعلَّمنا أموراً تخصّ مجموعَ الكون عبر النظر من خلال أقوى مجاهر العالَم (وهي مسرِّعات الجسيمات)، أكثرَ مما تعلمناه عبر النظر من خلال المقرابات (التلسكوبات). لا يوجد شكّ حالياً بأنه

كانت هناك لحظة فريدة للخلق وهي الانفجار العظيم، حدثت قبل حوالي أربعة عشر مليار سنة. أمّا كوكبنا الأرض فلم ينشأ ويتطوّر في الواقع إلاّ في فترة متأخرّة نسبياً من التسلسل الحقيقي للحوادث.

انبثق الكون حسب منظورنا العلمي المعاصر من حالة «تشوّش أو فوضى تامّة» للمادة، أي بلازما من المكوِّنات الأولية للمادة: كواركات وليبتونات وبوزونات معيارية وعديد من الجسيمات التي لم تُكتَشف بعد، اندفعت بعنف واهتياج ضمن ظروف تميَّزت بدرجات مفرطة للغاية من الحرارة والضغط وفي مكان وزمان جنينيَّين ملتويَين وملتفَّين على بعضهما البعض. لقد انفجر المكان نفسه وهو مدفوع بالطاقة النيئة الخامّ لمكوِّنات الكون، كما تمَّ شرحه لاحقاً بواسطة القوانين الهندسية لنظرية النسبية العامة لإينشتاين. ومع تمدّد واتّساع الكون وبلازما مكوِّناته، هبطت درجة حرارتها وأخذت بالتكاثف، لتحوِّل نفسها في النهاية إلى المادة العادية مشكِّلةً غاز الهيدروجين المنتشر بانتظام وبعض الهليوم إضافةً إلى جسيمات رُفاتية من الإشعاع الكهرمغناطيسي والنترينوات وربّما بعض الجسيمات الأخرى غير المعروفة. يمكن أن تكون بعض التموّجات والتراوحات الكمومية البدائية في كثافة تلك الجسيمات الرُفاتية قد تمَّ نقلها بواسطة قوة الثقالة إلى سحابة الهيدروجين، ممّا قاد إلى انهيارها ومن ثمَّ تشكيل المجرّات والنجوم الفائقة الجبّارة في الكون الباكر. كانت تلك النجوم ـ مثلها مثل جبابرة الأساطير ـ بمثابة الوالدَين لكلّ العناصر الثقيلة اللاحقة وللكواكب وللنجوم التي ستخرج إلى الوجود بما فيها شمسنا بالذات. ولقد منحنا أنفسنا إجازة شعرية هنا فاستعرنا التسمية، لذلك سوف ندعو في بعض الأحيان تلك النجوم الفائقة البدائية باسم الجبابرة.

إنّ جميع الذرات الأثقل وزناً كالكربون والأوكسجين والآزوت والكبريت والسيليكون والحديد وهلّم جراً (أي المادة الجوهرية

لصخورنا ولكوكبنا بمركّباته الصلبة والسائلة وللكواكب المجاورة لنا ولشمسنا بالذات وكذلك للنجوم المجاورة لها، وفي آخر المطاف مكونات الحياة نفسها) تمّ خلقها ضمن النجوم العملاقة أي الجبابرة. لقد تمّ خَبز العناصر الثقيلة بواسطة الاندماج النووي، ضمن أفران نووية عملاقة مقيَّدة عبر الثقالة الهائلة لتتوضّع عميقاً في قلب تلك النجوم ذات الضخامة الفائقة. وغدت الذرات(4) الثقيلة هي الأجزاء المكوِّنة الخامّ للكون الحديث، وبدونها لم يكُن بالمستطاع تواجُد أيّ بنية فعلية. إذاً في نهاية الأمر تشكّلت الكواكب عبر بنوّتها للجبابرة. وقادت الأحوال الخصوصية للكواكب بشكل تالٍ إلى التطوّر

(4) من أجل معلومات إضافية عن تشكيل وتكوين العناصر، انظر: «From the Big Bang to the End of the Universe: The Mysteries of Deep Space Timeline,» www.pbs.org (Public Broadcasting Service), and «Tests of the Big Bang: The Light Elements,» NASA WMAP, www. map.gsfc.nasa.gov

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 10 أيار/ مايو 2004).

ومن المقالات العلمية التي يمكن الحصول عليها هناك مقالة: Phillip James Edwin Peebles [et al.]: «The Case for the Relativistic Hot Big Bang Cosmology,» *Nature*, vol. 352 (1991), p. 769, and «The Evolution of the Universe,» *Scientific American*, vol. 271 (1994), p. 29.

إذا ما أدخلتَ كلمة **التركيب (الاصطناع) النووي** (Nucleosynthesis) في محرّكِ بحثٍ مثل **غوغل** (Google)، فإنه سيعطيكَ العديدَ من المواقع الإلكترونية الجيّدة. يهتمّ **التركيب (الاصطناع) النووي الموافق للانفجار العظيم** بكيفية تشكيل الهليوم والدوتيريوم والليثيوم في الكون الموغل جداً في القدم (قبل انتهاء الدقائق العشر الأولى تقريباً)، أمّا **التركيب (الاصطناع) النووي في النجوم** فهو يهتمّ بتشكيل العناصر الثقيلة في النجوم. يمكن قراءةُ سردٍ تفصيلي للتركيب (الاصطناع) النووي للعناصر الأثقل من الحديد في مقال التركيب (الاصطناع) النووي: www.ultraman.ssl.berkeley.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 10 أيار/ مايو 2004). أمّا المراجع العلمية الكلاسيكية عن التركيب (الاصطناع) النووي في النجوم فأهمّها: R. A. Alpher, H. A Bethe and G. Gamow, *Physical Review*, vol. 73 (1948), p. 803, and E. M. Burdidge [et al.], *Reviews and Modern Physics*, vol. 29 (1957), p. 547.

التدريجي والدقيق للحياة، وعلى كوكب الأرض إلى نشوء الفكر البشري والعواطف الإنسانية.

إن تخيّل التشكّل الباكر للنجوم والمجرّات الأولى شبيهٌ إلى حدّ ما بالسفر إلى مكان ناءٍ ومهيب، مثل جبال الألب(*) (Alps) أو جبال سييرا(**) (Sierra) أو الوديان الضيّقة لجنوب غربي الولايات المتّحدة، أو بتأمّل هيجان الفوهات المِرجَلية لـ يللوستون (الصخرة الصفراء)(***) (Yellowstone). إنّ جمال الطبيعة مُفعَم بالحيوية والفتنة في القصة العلمية الصحيحة، وإنّ ساغا(****) (Saga) الأطوار الأولى للكون فيها مشتركةٌ بين جميع الموجودات الحيّة التي قُدِّر لها في وقتٍ ما أن تقف أو تمشي أو تزحف على الأرض أو على أيّ كوكب آخر وهذه القصة العلمية الصحيحة من تراثنا هي أكثر غنى من أيّ قصة خرافية، وهي أكثر غموضاً في واقعها، كما أنه يمكن اعتبارها أكثر بعثاً للراحة بالنسبة إلينا من حيث منطقها الذكي. ومن الآن فصاعداً سوف نتخلصّ من الآلهة الخرافية، وننغمس بكليّتنا في الكون الطبيعي، لنتابع قصة الجبابرة الحقيقيين في ما سيأتي.

شفَق الجبابرة: GÖTTERDÄMMERUNG

كيف تحرَّرت العناصر الثقيلة من أعماق قلوب النجوم الجبابرة

(*) سلسلة جبال أوروبية تمتدّ على أراضي عدة دول منها سويسرا وفرنسا وألمانيا والنمسا وإيطاليا وسلوفينيا وكرواتيا.

(**) اسم يُطلَق على عدة سلاسل جبلية في غرب الولايات المتّحدة الأميركية وفي جنوب إسبانيا وفي غرب فنزويلا تتميَّز كلها بحدّة النتوءات الصخرية.

(***) أكبر محمية طبيعية وطنية في الولايات المتّحدة الأميركية، تقع في شمال غرب ولاية ويومينغ (Wyoming)، وتحتوي على أكثر من 3000 ينبوع حارّ.

(****) كلمة من أصل اسكنديناڤي تعني قصة نثرية طويلة زاخرة بالأحداث البطولية.

فائقة الضخامة التي تشكّلت ضمنها؟ في الواقع قامت الأفران النووية في باطن النجوم الجبابرة في نهاية الأمر بتسميم نفسها بنفسها، فبعد امتلائها بالحديد ذي النواة الذرية الأكثر استقراراً بين الجميع، لم يعُد بإمكانها الاستمرار بالاحتراق بواسطة الاندماج النووي. وهكذا بدأ تهاوي وانهيار الجبابرة، فأجسامها مفرطة الوزن ـ بعد أن امتلأت بالعناصر الثقيلة حديثة التشكّل ـ أخذت الآن تحت تأثير قوة الثقالة بالتجوّف نحو الداخل. ونظراً لتوقّفها عن معاكسة الثقالة من خلال الإشعاع الشديد لمحرّكاتها النووية، فقد تعرَّضت لتغيّراتٍ فجائية وسريعة عميقاً في الأقسام اللبّية لها. هناك حيث كانت ذرات الحديد تدعم الوزن الكلّي للكتلة مفرطة الضخامة ضد الانهيار بفعل قوى الثقالة، حدث أمر يشبه ما يصيب غلافَ غوّاصة تغطس أكثر من العمق الذي تتحمّله، إذ انهارت تلك الذرات وتهاوت. تمَّ كبس ذرات الحديد، وتعرَّضت لدرجات هائلة جداً من الضغط والكثافة. وأدّى ذلك على الفور إلى خلق حالة جديدة من المادة لم تكن موجودة أبداً في الكون من قبل.

تتألف الذرة من **إلكترونات** تدور في المجال الخارجي **للنواة** المتراصة التي تحدِّد معنى مركز الذرة. وتتكوّن النواة من **بروتونات ونترونات**. عندما يصل نجم من الجبابرة إلى المرحلة الأخيرة من الانهيار، يتمّ كبس الإلكترونات والبروتونات في المنطقة اللبّية له مع بعضها البعض. وعندئذٍ تقفز إلى واجهة الأحداث فجأةً مجموعةٌ جديدة من العمليات الفيزيائية تتوارى عادةً بصمت في الظلال الخلفية لعالَم الحياة اليومية المحيط بنا. تُدعى هذه العمليات **بتفاعلات القوى الضعيفة**، وهي تقوم بشكلٍ سريع بتحويل البروتونات والإلكترونات المكبوسة مع بعضها إلى نترونات، وتولِّد أيضاً كمُنتَج ثانوي عصفةً انفجارية من جسيمات أولية تُدعى **النترينوات**. تأخذ العملية المسيطرة من تفاعلات القوى الضعيفة التي تدمِّر الجبابرة الشكلَ التالي:

$$p^{+} + e^{-} \rightarrow n^{0} + \nu_{e}.$$

أو باستخدام الكلمات «زيادة إلكترون إلى بروتون يعطي نترون مع نترينو الإلكترون».

في اللحظة التي يحدث فيها تهاوي لبّ أحد الجبابرة، تسرق تفاعلات القوى الضعيفة الأضواء على مسرح الأحداث. يتمّ ضغط وعصر القسم الأكثر باطنيةً من لبّ النجم الجبّار إلى كرة مادتها نترونية خالصة، تكون مكتنزة ومتراصّة بشكل شديد، حيث يمكن ألاّ يتجاوز قطرها أكثر من عشرة أميال، بينما تكون كتلتها مساوية لكتلة شمسنا، ومن ثم تكون كثافتها أكثر من كثافة الشمس بتريليون مرة. وتتدفَّق النترينوات بشكل شديد الاهتياج خارج اللبّ، ومع تقدّم الاندفاع المسعور للنترينوات تتفجَّر القشرة الخارجية للنجم الجبّار. وهذا الأمر يسِمُ ما ندعوه **المستسعرة الحرارية الفائقة (السوبرنوفا)**: إنها الانفجار الأكثر حدّة والأكثر إثارةً للذهول في الكون منذ حدوث الانفجار العظيم.

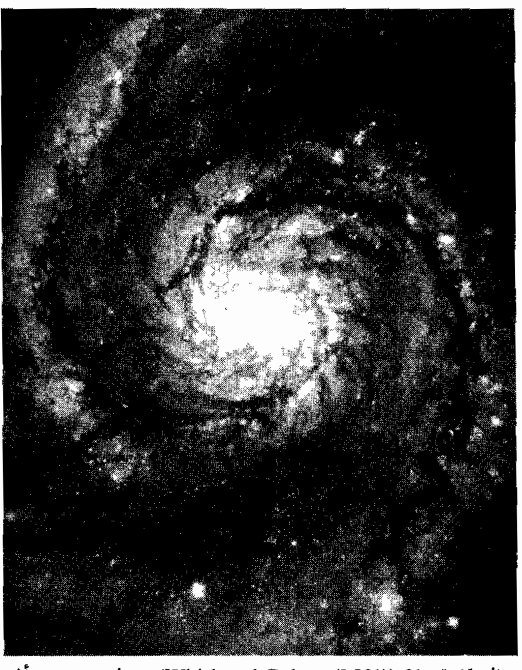
إنّه أمرٌ لافتٌ للنظر ومثيرٌ للسخرية أن تلك «الأم الوحشية الضارية لكل الانفجارات» تنجم عن النترينو ذي المكانة الوضيعة، ذلك الجسيم الأولي الذي يبدو في الحالات الأخرى كأنه الأكثر خمولاً وتوارياً عن الأنظار من بين كل الجسيمات. إنّ هبّةَ النترينوات للخارج تأخذ معها كل المادة الخارجية للنجم وفيها العناصر التي اصطُنعَت (ورُكِّبت) حديثاً، وهذا يؤدي لتوليد وميضٍ لامع من الضوء يفوق بريقاً بعدة ملايين من المرات كل النجوم الّتي تتألّق في مجرّةٍ منفردة. وهكذا وباعتبار أنّ القشرة الخارجية لجسم النجم الجبّار تحتوي على كل العناصر من الهيدروجين حتى الحديد، فإنّ تلك العناصر يتمّ نثرها في الفضاء. أمّا ما يُترَك بعد ذلك فهو نجم نتروني كثيف دائر بحركة تدويمية أو ربّما ثقب أسود، وذلك كأثر متبقٍّ ضئيل من اللبّ النتروني

الخالص للنجم الجبّار، بكتلةٍ تفوق كتلة شمسنا كلها.

مع مرور الزمن تتجمّع سُحُب الغاز والغبار والحطام التي أصبحت الآن تحتوي على العناصر الثقيلة (أي النفايات أو الرماد الناجم عن موت العديد من الجبابرة وفق المصير العنيف الذي وصفناه)، وتقوم بالإحاطة بالمجرّات. وهذا يعطي المجرّات شكلاً جديداً يتّصف بالعظمة والمهابة، حيث تبدو كحلزونات مكوَّنة من خيطان رقيقة كنسيج العنكبوت ذات أذرع لولبية ممتدّة ومغلَّفة (انظر مجرّة الدوّامة (Whirlpool Galaxy) في الشكل 1). وفي ثنايا اللوالب الخارجية للمجرّات تتمّ ولادة ذُرّية الجبابرة، أي الجيل الثاني من النجوم ذات الحجم الصغير نسبياً وذات اللون الأصفر مثل شمسنا بالذات، ومعها تلد المذنّبات والنجيمات والكويكبات والأقمار والكواكب. تتركَّب النجوم الجديدة من الرماد الغازي والمعدني للجبابرة، بينما تُبنى الكواكب من الصخور المكوَّنة من العناصر التي وُلدت داخل الجبابرة. وهؤلاء هم بمثابة الأولاد الحقيقيين للجبابرة.

إنّ وجود مادة الحياة اليومية ووجود الكواكب والعالَم الذي نسكنه اليوم بل وجود الحياة **ووجودنا نحن بالذات**، يعود الفضل فيه كلّه إلى الإبادة العنيفة لتلك النجوم المجهولة، أي الجبابرة البدائية التي ماتت بطريقة وحشية دخلت في عالَم النسيان قبل مليارات السنين عبر مستسعراتها الحرارية الفائقة (السوبرنوفات). كلّ «مادة حياتنا اليومية» تمّ طبخها وتحميصها سويةً ضمن تلك الحرائق الملتهبة الرهيبة. وعملية تكوين العناصر الثقيلة هذه مازالت مستمرة في أرجاء الكون حتى اليوم، فلا يزال هناك العديد من الجبابرة حتى في وقتنا الحاضر تتألق بالضوء الناجم عن اندماج الهيدروجين الصرف والهيليوم، وهي تقطن ضمن الفجوات الداخلية في المناطق المركزية للمجرّات، وتثور وتنفجر بعنف من حينٍ إلى آخر. تنير المستسعراتُ الحراريةُ الفائقة للحظاتٍ عابرة مجرّاتٍ بعيدة بمقدار ملايين من السنين الضوئية عنّا

كانت لولاها ستكون معتمة، إذ تومض في الكون البعيد المظلم مثل الألعاب النارية في الليل. وهناك في مجرّتنا نفسها نجوم ليست بعيدة كثيراً عن الأرض - ربما يكون منها النجم غير المستقرّ المسمّى إيتا كاريني (نجمة سهم القصّ) (EY-ta kar-IN-ee) (η Carinae) والذي هو في طور الاحتضار - سوف تسطع في يومٍ من الأيام في سمائنا ذاتها من خلال نهاياتها المأسوية العنيفة.



الشكل 1 : مجرّة الدوّامة م51 ((Whirlpool Galaxy (M51))، تظهر وجود أذرع لولبية رائعة المنظر متميّزة بشكل جيّد، تحتوي على حطام الانفجارات النجمية والمادة الخامّ لتشكيل النجوم المستقبلية. هذه الصورة تمثّل تقريباً لما ستبدو عليه اليوم مجرّتنا درب التبانة (أو الطريق اللبنية) (Milky Way) عندما يُنظَر إليها من مسافة بعيدة. (تمَّ نشر الصورة بإذن من ناسا (NASA) وفريق هبل هيريتيج (Hubble Heritage). تمَّ تركيب الشكل الظاهر في الصورة من قبل فريق هبل هيريتيج من معطيات أرشيف هبل الخاصة بـ م 51 بعد أن تمَّ دمجها مع معطيات مأخوذة من الأرض من قبل ترافيس ريكتور (Travis Rector) بمقراب الـ 0,9 م في مرصد كيت بيك Kitt Peak الوطني للمؤسسة العلمية الوطنية في توكسون (Tucson) أريزونا (Arizona).

الأرض

تمَّت ولادة الشمس والأرض وبقية الكواكب الأخوة لكوكبنا في المنظومة الشمسية عندما بلغ الكون عمر تسعة مليارات سنة تقريباً. تكثَّفت المنظومة الشمسية مثل قطرات مطر عملاقة في سحابة الغبار والحطام التي أعقبت النجوم الجبابرة القديمة في الأذرع البعيدة للمجرّة الحلزونية. وتلت ذلك فترة طويلة من التشويه الشكلي بسبب التعرّض لقذائف المذنّبات والنيازك إضافةً إلى ثوران زلازل هائلة واندفاعات بركانية ضخمة، فولادة أيّ كوكب وكذلك مراحل طفولته ليست على الإطلاق مسيرة هادئة مسالمة. عندما وصل عمر الأرض إلى 2 مليار سنة تصلَّبت قاراتها، وبدأت الأرض تستضيف تدريجياً الأشكال الباكرة للحياة. ولقد تطلَّب بدء الحياة على الأرض ظروفاً عنيفة وديناميكية كي تحثّ الكيمياء وتتلاعب بالجزيئات مفرطة التعقيد وتعطي دفعة البدء للعملية المعقّدة الخاصة بالتناسل التي تعني تواجد الحياة. وفي المرحلة التالية للحياة ـ المرحلة الشبيهة بسن الرضاعة عند الطفل ـ تكاثرت الأشنيات والطحالب موطِّدةً نفسها في محيطات المياه الغازّية للأرض.

لو نظرنا الآن إلى كوكب الأرض، منزلنا الأزرق ـ الأخضر، مهد كل شيء نعرفه، لبدا لنا في حالته آنذاك كأنه عالم بعيد وغريب كل الغرابة. كانت الأرض تنهي عهداً من الطفولة المظلمة والعنيفة والغاضبة، وكانت تسير في طريق النضج والاستقرار، فقد بدأ غلافها الجوّي باكتساب الأوكسجين كفضلات ناتجة عن الأشنيات التي قامت بتنفس وهضم ثاني أوكسيد الكربون الموجود بوفرة في الغلاف الجوي وفي المحيطات. لكن الأرض كانت لا تزال بركانية لدرجة عالية بحيث لا تصلح لسكنى أشكال أرقى من الحياة.

قبل ملياري سنة كان كوكبنا كذلك **شديد النشاط الإشعاعي**. لقد أنتج الجبابرة العديد من العناصر، وكانت منها ذرات أثقل بكثير من الحديد. خُلِقت هذه الذرات في الثواني العنيفة الأخيرة من حياة النجم الجبّار: فهي الأنقاض ذات النشاط الإشعاعي للانفجار النووي الضاري للمستسعرة الحرارية الفائقة (السوبرنوفا). كان اليورانيوم واحداً من العناصر الأكثر ثقلاً التي صُنِعت في انفجارات الجبابرة، وقد تمَّ اندماجه ضمن الأرض الأصلية حين تشكّلها. ومن الجدير بالملاحظة أنّ اسم «اليورانيوم» مشتقّ أصلاً من اسم أحد الجبابرة الأجداد وهو «أورانوس»، فاليورانيوم إذاً هو جزء طبيعي من أجزاء ومكوِّنات الأرض.

نقوم في الوقت الراهن باستخراج اليورانيوم من المناجم مثله مثل بقية المعادن، وذلك من الرسابات التي تركَّز فيها بواسطة الفعل المذيب للماء الذي سال وانتشر عبر الصخور. وبين العديد من التطبيقات العملية التي نستخدم فيها هذا المعدن الثقيل ذا اللون المصفرّ، يأتي إنشاء المفاعلات النووية وصناعة الأسلحة النووية. يعرِّف العلماء **اليورانيوم** بأنه أيّ ذرة تحتوي نواتها على 92 بروتوناً. ولكن عدد النترونات في النواة يمكن أن يتغيَّر، مما يعطينا عدة **نظائر** مختلفة من اليورانيوم. غالبية اليورانيوم الذي يوجد في المناجم هذه الأيام هو من الشكل ^{238}U (ويُقرأ كـ «U-238») مع جزء ضئيل من النوع ذي الشكل ^{235}U («U-235»). يشير الرقم 235 إلى **العدد الكلّي للنترونات والبروتونات معاً** في النواة؛ ومن هنا يكون لدى ^{235}U: (235 - 92 = 143 neutrons). وهكذا يمتلك النظير 238 لليورانيوم في نواته ثلاثة نترونات أكثر من الشكل 235. وعندما يُستخرَج اليورانيوم من المناجم اليوم، فإنه يحتوي على 99,3 في المئة من الشكل ^{238}U ومجرَّد 0,7 في المئة من الشكل ^{235}U.

تُسمّى عملية «فلق» النوى الذرية **بالانشطار**. ولا يمكن أن يحدث الانشطار النووي إلاّ في العناصر الثقيلة جداً، أي الأثقل من الحديد بكثير، وتتحرّر من عملية انشطار نواة ثقيلة كميةٌ كبيرةٌ من الطاقة. وتحرير تلك الطاقة هو الذي يستطيع أن يقود مفاعلاً نووياً (أو قنبلةً نووية) إلى ما يُدعى **بتفاعلٍ تسلسلي ثابت البقاء أو انطلاقي هارب**. لإنشاء مفاعل نووي أو سلاح نووي يلزمنا القيام **بتخصيب** الشكل ^{238}U بزيادة نسبة الـ ^{235}U في المزيج. وفي اليورانيوم المخصَّب ينجم عن انشطار نواة مفردة عدةُ نترونات شريدة مع «نوى بنات» أخفّ وزناً تُصبح ذراتٍ جديدة. تتجوَّل النترونات الشريدة حتى تصطدم بنواة يورانيوم أخرى، وهذا بدوره يطلق شرارة انشطار تلك النواة منتجاً مزيداً من النوى البنات ومزيداً من النترونات الشريدة ومزيداً من الطاقة وهلّم جراً.

إذا كان لدينا من المادة القابلة للانشطار كميةٌ صغيرةٌ لا غير، فإنّ التفاعل التسلسلي ثابت البقاء لا يحدث. إذ تعبر ببساطة غالبية النترونات الشريدة حدودَ المادة، لتمرّ إلى الخارج قبل أن تضرب نواةً أخرى. بالمقابل إذا تمَّ تركيز كمية **كافية** من اليورانيوم المخصَّب مع بعضها بحيث تشكِّل **كتلةً حرجةً،** فإن التفاعل التسلسلي يصبح ثابت البقاء. ومع **كتلة فائضة (فوق الحرجة)** يتسارع التفاعل التسلسلي ويصبح «انطلاقياً». يسخن اليورانيوم إلى درجات حرارة هائلة، وفي النهاية ينصهر ويصير ذا فقاعات ويزبد ويتدفق. لكن إذا تمَّ ضغطه وكبسه في نفس الوقت بواسطة متفجرات تقليدية، فإن الكتلة فوق الحرجة سوف تنفجر: وهذا هو مبدأ القنبلة الذرية (الانشطارية). يحدث تفاعل نووي بطيء يحافظ على بقائه بنفسه عندما يحتوي المزيج على حوالي 3 في المئة أو أكثر من الـ ^{235}U و97 في المئة من الـ ^{238}U. أما **اليورانيوم المخصَّص للأسلحة** فهو يتضمن نسبةً

أعلى بشكل كبير من الـ ^{235}U، وبشكلٍ نموذجي أكثر من 90 في المئة.

عندما انفجرت النجوم الجبابرة العديدة في مجرّتنا الفتية، تمَّ إنتاج كميات متساوية نوعاً ما من هذين النظيرَين المختلفَين لليورانيوم، وتمّ قذفها للخارج مع الأنقاض التي كوَّنت اللوالب الحلزونية لمجرّتنا. وهذه الأنقاض اندمجت لاحقاً مع كوكبنا الأرضي. إذاً لماذا لا يؤلّف النظير ^{235}U سوى نسبة ضئيلة من اليورانيوم الذي نجده في مناجم الأرض اليوم؟ السبب هو أن النواة الذرية للـ ^{235}U هي أقلّ استقراراً، ومن ثم تتعرض **للتفكّك** التلقائي بمعدَّل أسرع من نواة الـ ^{238}U. وجد الفيزيائيون أن **العمر النصفي** (عمر نصف الحياة) للـ ^{235}U هو حوالي 700 مليون سنة أي ما يقارب سدس عمر الأرض الحالي. وهذا يعني أنّ أونصة وحدة من الـ ^{235}U اليوم سوف تتضاءل إلى نصف أونصة بعد 700 مليون سنة. أما نصف الأونصة الآخر فسوف يكون قد صار ذرات أخرى أخفّ وزناً هي المُنتَج الثانوي لعملية التفكّك والانحلال. ومن جهةٍ أخرى، فإن العمر النصفي للـ ^{238}U هو حوالي 4,5 مليار سنة أي أطول بكثير من الـ ^{235}U، ويقارب عمر الأرض نفسها. لذلك كلما كانت الأرض تتقدَّم في السن، كانت تنقص أكثر فأكثر نسبة الـ ^{235}U عند مقارنتها مع الـ ^{238}U ذي الحياة الأطول. وهكذا مع امتداد عمر الأرض، أصبح الـ ^{238}U ذو الحياة الأطول هو المسيطر في مجمل الكمية المتوفّرة من اليورانيوم على الكوكب.

لكن قبل ملياري سنة كانت الكمية المتوفّرة (الوفرة النسبية) من الـ ^{235}U ـ استناداً إلى ما ذكرناه أعلاه ـ أكثر بكثير منها في الوقت الحالي. في الواقع كانت نسبته تتجاوز الـ 3 في المئة بالمقارنة مع

الشكل ^{238}U، ومن ثم **كان اليورانيوم المخصَّب في ذلك الحين مادة تتوفَّر بشكل طبيعي على الأرض.** وحيث إنّ اليورانيوم المخصَّب كان موجوداً بشكل طبيعي في الأرض اليافعة، فإنّ الظاهرةَ التي تقابل مجازياً الإلهة الأم غايا فعلت شيئاً مميَّزاً بكل معنى الكلمة: **لقد صنعت مفاعلاتها النووية الذاتية.** تمَّ تكوين هذه المفاعلات النووية كرسابات معدنية كثيفة تركَّز فيها اليورانيوم بشكلٍ طبيعي ضمن عروقٍ واسعة الامتداد لكنها ضحلة، وذلك بواسطة تدفّق الماء وانتشاره عبر تصدّعات وشقوق الصخور. بدت المفاعلات النووية الخاصة بالطبيعة كلطخاتٍ غير منتظمة أو عديمة الشكل، مثل اللبّ المنصهر الذي نصادفه إذا حدثت كارثة في مصنع معاصر مولِّد للطاقة النووية، حتى أنه يمكن القول إنّها تشيرنوبيلات(*) (Chernobyls) كانت تحدث بشكل طبيعي. لقد كانت تُشوى وتتمّ خضخضتها وهي ضمن الصخور الحاضنة لها، لتفيض بنفايات مصهورة ذات نشاط إشعاعي، ولتطلق أبخرةً وغازات ذات نشاط إشعاعي أيضاً من خلال ينابيع الحمم والفوهات ذات الزئير المخيف. كانت هذه المفاعلات تلتهم وقودها الانشطاري، وبنفس الوقت تسمّم نفسها بنفسها بفعل نفاياتها الذاتية ذات النشاط الإشعاعي. لكن تلك النفايات كانت تنتشر بعد ذلك وتغلي أو تُصاب بالتفكّك، فتزول سامحةً للمفاعلات بأن تبدأ عملها من جديد. وهكذا كان يتمّ الأمر، فقد أعادت تلك المفاعلات الطبيعية العمليةَ المذكورة ـ أي إنّها توقَّفت عن العمل ورجعت له مراراً ومراراً خلال فترة امتدَّت ملايين السنوات ـ حتى استهلكت في النهاية وقودها من اليورانيوم المخصَّب، وماتت بهدوء.

(*) أسوأ كارثة حدثت في مفاعل نووي، في عام 1986 في الاتحاد السوفياتي.

منجم أوكلو

في عام 1971 اكتُشفَت بقايا واحد من سبعة عشر مفاعلاً نووياً قديماً طبيعي النشوء، وسط رسابة من اليورانيوم الخامّ، وذاك في قرية أوكلو (التي تُلفَظ: أوك ـ لو) في الغابون في غرب أفريقيا. كانت مفاعلات منجم أوكلو الطبيعية تُنتج ـ عندما كانت فعّالة ـ نفاياتٍ ذات نشاط إشعاعي مطابقة لتلك التي تنجم عن المفاعلات النووية المعاصرة في مصانع توليد الطاقة. لم يبقَ من المواقع السبعة عشر الأصلية في منجم أوكلو سوى واحد فقط يستحقّ الاهتمام على وجه الخصوص في الوقت الحاضر، حيث إن أربعة عشر منها كانت قد أنهيت فيها أعمال الاستخراج قبل حدوث الاكتشاف المهمّ عام 1972. واثنان من المفاعلات القديمة لا يزالان بانتظار الاستكشاف بعد[5].

يمكن رؤية بقايا ذلك المفاعل النووي الأحفوري في جدار نفق محفور تحت سطح الأرض. وهي تبدو بشكل صخرة لها لون خفيف الصفرة ذات مظهر كأنه صنعي أي غير طبيعي، تتركّب بغالبيتها من أوكسيد اليورانيوم مع شرائط من الزجاج الكوارتزي ذي الوميض. الكوارتز هو سيليكون متبلور تمَّ إنتاجه من الحمّام الذي قامت به المياه الجوفية فائقة السخونة وهي تمرّ في الرمال عبر لبّ المفاعل خلال حياته وبعد انتهائها. أَنتجت مفاعلات منجم أوكلو جميعَ المُنتَجات الثانوية التي نجدها في الانشطار الاعتيادي، مثل

(5) انظر بشكل خاصّ: «Oklo's Natural Fission Reactors,» American Nuclear Society, www.ans.org; «Oklo Fossil Reactors,» Curtin University Center for Mass Spectrometry, www.curtin.edu.au, and «Oklo,» www. en.wikipedia.org.
(جميع المواقع وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 10 أيار/ مايو 2004).

^{239}Pu (البلوتونيوم ـ 239 Plutonium-239) وهو عنصر ذو نشاط إشعاعي عالٍ وذو سمّية مروّعة، يُستخدَم أيضاً في الأسلحة. يحترق البلوتونيوم بعملية انشطار خاصة به، سويةً مع اليورانيوم المخصَّب. وحيث إنّ البلوتونيوم له عمر نصفي قصير نسبياً بحدود أربعة وعشرين ألف سنة، فإنه لم يكُن موجوداً بشكل أساسي في سحابة الحطام عندما تشكَّلت الأرض، وهذا يثبت أن مفاعلات منجم أوكلو كانت بالفعل مفاعلات نووية حقيقية وقد قامت بإنتاج البلوتونيوم ذاتياً.

إن المفاعلات النووية لمنجم أوكلو هي ظاهرة طبيعية مذهلة، ففي الوقت الذي كانت فيه تلك المفاعلات تحرق بشكل تلقائي وقودها الانشطاري، كان الكون أصغر عمراً بحوالي 15 في المئة ممّا هو عليه اليوم. وهذا يقودنا إلى نتائج تنعكس على الفرضية المتعلّقة بالثبات الأبدي للطبيعة نفسها. هل يمكن أن يكون الكون بقوانينه عن الطبيعة قبل ملياري سنة مختلفاً قليلاً عمّا هو عليه اليوم؟ هل كانت جاذبية الثقالة حينئذٍ مختلفةً قليلاً، كأن تكون أضعف أو أقوى؟ هل كانت القوى الكهرمغناطيسية للطبيعة هي نفس القوى الحالية؟ هل القوانين التي تتحكّم بالعمليات النووية متطابقة تماماً بين ما كانت عليه في الكون الباكر وبين ما هي عليه في الوقت الحاضر؟

تزوّدنا المفاعلات النووية لمنجم أوكلو بنافذة حسّاسة ورائعة على الفيزياء وكذلك على القوانين الأساسية للطبيعة في العالَم كما كانت قبل ملياري سنة، فكلّ المفاعلات النووية تولِّد عناصر نادرة متنوّعة كمُنتَجات ثانوية لتفاعلاتها النووية. وهذه التفاعلات تتضمّن العمليات المتطرّفة التي لا يمكن حدوثها إلاّ في النجوم أو في

مفاعلات نووية، تلك العمليات التي هي حسّاسة بشكل مرهف للقوانين الدقيقة للطبيعة. قبل بناء المفاعلات النووية المعاصرة، كان ذلك الوقت هو الوحيد الذي اصطُنعت فيه تلك العناصر النادرة على الأرض. إحدى تلك العمليات النووية قادت إلى اصطناع العنصر شديد الندرة المسمّى ساماريوم (Samarium)، ذي الرمز الكيميائي Sm.

اكتُشِف الساماريوم في باريس عام 1879 من قبل الفرنسي ب. إ. ليكوك دو بوابودران (P.-E. Lecoq de Boisbaudran). يمتلك هذا المعدن الجميل اللامع ذو اللون الفضّي وغير السامّ بريقاً متألقاً. معظم الساماريوم الموجود على الأرض هو بدائي المنشأ، تمَّ إنتاجه من قبل النجوم الجبابرة. وهو يوجد عادةً ضمن تشكّلات جيولوجية معدنية (غير عضوية) عديدة، ويمكن فصله كيميائياً عن بقية الذرات الثقيلة التي ترافقه في العادة. يُستخدَم هذا العنصر في الصناعة لتوليد أضواء ساطعة خاصة بأجهزة الإسقاط السينمائي وكذلك في بعض أنواع الليزر، إضافةً إلى استخدامه في إنشاء المفاعلات النووية نفسها.

يعلّمنا منجم أوكلو في الواقع شيئاً دقيقاً وبنفس الوقت عميق المعنى بخصوص العمل الفذّ الذي قامت به الطبيعة في مجال الهندسة النووية: إن مقدار وفرة الساماريوم الذي تمَّ إنتاجه في المفاعلات النووية الطبيعية لمنجم أوكلو قبل ملياري سنة من الآن **هو بالضبط المقدار الذي كنّا سنتوقّع وجوده اليوم!** لماذا يُعتَبر هذا الشيء أمراً مهماً جداً؟ في الحقيقة نحن نعرف أن إنتاج الانشطار النووي لهذا المُنتَج الثانوي هو أمر ذو حساسية مفرطة للتأثيرات الفيزيائية المعقّدة التي تتمّ ضمن المفاعلات النووية، فلو كانت

هناك مجرّد تغيّرات طفيفة في القوانين الأساسية للفيزياء في الزمن الغابر الذي كانت فيه مفاعلات منجم أوكلو تقوم بوظيفتها قبل ملياري سنة من الآن، لكان من المستحيل على الإطلاق أن يتمّ إنتاج أيّ ساماريوم. وهكذا فإن منجم أوكلو ـ بإراءته إيانا المقدار الصحيح من توفّر مُنتَجه الثانوي الساماريوم ـ يخبرنا **أن الكون لابدّ أن يكون لديه نفس قوانين الفيزياء قبل ملياري سنة مثلما لديه في الوقت الحاضر**. في حقيقة الأمر يستطيع الفيزيائيون ـ من خلال قياس مقدار وفرة الساماريوم في منجم أوكلو ـ أن يخمّنوا أنّ قوانين الفيزياء المعنية لا يمكن أن تكون قد تغيَّرت مع الزمن بأكثر من 1/1,000,000 (جزء واحد من مليون جزء) طوال عمر الكون كلّه[6].

ثبات قوانين الفيزياء واستقرارها

إن قوانين الفيزياء التي تتغيَّر نوعاً ما مع مرور الزمن هي شيء غريب وشاذّ ويؤدي للتشويش عند التأمّل فكرياً. في الواقع لنتساءل ما هي الكيفية التي كان يمكن لقوانين الطبيعة أن تكون مختلفة بها في الكون الباكر قبل ملياري سنة بحيث تؤثّر على الطريقة التي يُنتَج بواسطتها الساماريوم في مفاعلٍ نووي؟ لقد تبيَّن أنّ **انحرافاً ضئيلاً للغاية في كتلة النواة الذرية** للساماريوم كان سيكفي **لمنع تشكّله** تماماً في المفاعلات النووية لمنجم أوكلو. من الناحية النظرية يمكن

(6) بالإضافة إلى المعلومات المتوفّرة في المراجع المذكورة في الملاحظة 5، وللتزّود بمعلومات عامة تناقش الحدودَ والقيودَ التجريبية الموضوعة على الاعتماد الزمني للوسائط (البارامترات) الأساسية في الفيزياء، انظر: F. W. Dyson, «Time Variation of Fundamental Constants,» in: Abdus Salam and E. P. Wigner, eds., *Aspects of Quantum Theory* (Cambridge: University Press, 1972), pp. 213-236.

أن نتخيَّل إمكانية حدوث ذلك بعدة طرق مختلفة، لكن هذا يستلزم أن تكون قوانين الطبيعة مختلفة نوعاً ما في ذلك الزمن السابق، فعلى سبيل المثال إذا كانت القيمة الكميّة لوحدة الشحنة الكهربائية للإلكترون أو البروتون مختلفة قليلاً قبل ملياري سنة، فإن هذا الفارق الضئيل كان سيؤثِّر على التآثرات الكهرمغناطيسية بين البروتونات في النواة. وهذا كان سيغيّر قليلاً كتلة نواة ذرة الساماريوم بمقدارٍ موافقٍ له. لكن من خلال تحليل مدى وفرة الساماريوم في منجم أوكلو، قام العلماء بالحسابات ووجدوا أن قيمة الشحنة الكهربائية لا يمكن أن تكون قد تغيَّرت بأكثر من 1/10,000,000 (جزء واحد من عشرة ملايين جزء أو 10^{-7}) في الوقت الذي كان منجم أوكلو لا يزال يحرق اليورانيوم أثناءه. وهذا يعني أن قيمة الشحنة الكهربائية لا يمكن أن تتغيَّر بأكثر من 1/100,000,000,000,000,000 (جزء واحد من مئة مليون مليار جزء أو 10^{-17}) في السنة في الوقت الراهن. وهذا أمرٌ يوحي بوضوح أو حتى يؤكِّد نوعاً ما الاكتشاف الخاصّ بثبات قوانين الفيزياء عبر الزمن.

لا يقف منجم أوكلو بمفرده في ما سبق، بل هناك مؤشّرات عديدة أخرى تدلّ على استقرار القوانين الفيزيائية عبر الزمن، فعلماء الفلك يستطيعون أن يمعنوا النظر بواسطة مقراباتهم إلى مجرّات قاصية ويرَون أن نفس العمليات الفيزيائية تجري في تلك العوالم البعيدة جداً مكانياً والقديمة جداً زمنياً مثلما تحدث هنا في مختبراتنا على الأرض اليوم. ومقدار توفّر عناصر معيّنة في الأحجار النيزكية يخبرنا أن عمليات أخرى حسّاسة للغاية هي اليوم نفس ما كانت عليه قبل مليارات السنين. وفي السبعينيات من القرن العشرين سمحت لنا مهمّة بعثة فايكنغ (Viking Mission) ـ التي أرسلت إلى المريخ من

قبل وكالة ناسا (NASA) ـ بالقياس الدقيق لقوة الثقالة، وهذا القياس بدوره قرَّر أن تلك القوة لا تتغيَّر مع مرور الزمن. وإذا جمعنا كل ذلك سويةً فإننا نستطيع القول إنّ جميع الدلائل التجريبية تقترح فرضية معقولة عن قوانين الطبيعة: **إن القوانين الفيزيائية هي قوانين ثابتة وهي لا تتغيَّر مع مرور الزمن.**

إنّ الثبات الأبدي للقوانين الفيزيائية هو **تناظر**. ما نراه عندما ننظر إلى الخلف عبر الزمن أو عندما نحدِّق من خلال المقرابات في الفضاء الخارجي أو عندما نستخدم أقوى المجاهر التي صنعناها (مسرِّعات الجسيمات)، هو نفس المنظومة من القوانين الفيزيائية التي تتحكَّم بكامل الكون في جميع الأزمنة وجميع الأمكنة. إنها التناظرات الأساسية لبنية كوننا وبنية مكوِّناته، وبتعبير آخر أكثر عمقاً إنها تناظرات القوانين التي تحكم الكون نفسها. في حقيقة الأمر إنّ التناظرات التي نميط اللثام عنها هي المبادئ الأساسية التي تعرِّف لنا قوانين الطبيعة وقوانين الفيزياء وبالنتيجة القوانين التي تسيطر على كوننا. وكما سنرى الآن، فإنّ ثبات القوانين الفيزيائية له نتائج مباشرة على وجود حياتنا اليومية نفسها.

الفصل الثاني
الزمن والطاقة

الطاقة هي السعادة الأبدية

وليام بلايك (William Blake) ـ **زواج الجنة مع جهنّم** (*Marriage of Heaven & Hell*)

لا يمكن حدوث هذا الأمر هنا

إن شركة الأوج للطاقة الكهربائية (Acme Power Company) هي شركة غير موجودة، وحسب معلوماتنا لم يسبق لها الوجود قطّ. وأيّ تشابه بين هذه الشركة وبين شركة أخرى في مجال الطاقة هو محض صدفة، سواء أكانت الشركة الأخيرة قيد العمل أم لا، وجودها كان في الزمن الماضي أم لا تزال موجودة في الوقت الحاضر، أعمالها ذات أثر في الواقع الراهن أم أنها بادت واندثرت، مدراؤها محتجزون في السجون أم طلقاء أو خرجوا بكفالة، والمستثمرون فيها حقيقيون أم خياليون، فشركة الأوج للطاقة الكهربائية هي شركة اختلقناها لإثباتِ فكرة في مجال الفيزياء.

لا شكّ أنّ التاريخ شهد كثيراً من الشركات التي على شاكلة شركة الأوج. هذه الشركات تَعِدنا ـ وهي كاذبة لسوء الحظ ـ بالربح

الوفير الذي سنحصل عليه من دون مقابل، وتبشّر المستثمرَ الذي يلج طابقَها الأرضي بثروة طائلة ستحلّ عليه. وبالنسبة إلى شركة الأوج لا يعني ما سبق أننا نودّ تفنيد ادّعاءات الآباء المؤسسين لها، لأنّ الأمر برمّته هنا لم يتعدّ في بداياته مجرّد خطأٍ بسيط غير مقصود، ولكنّ الاستمرار في عدم ملاحظة الخطأ أدّى لتفاقم الأمور واكتسب ذلك زخماً قوياً لا يمكن إيقافه. لقد دخل إلى ساحة الأحداث كثيرٌ من المحلّلين والمصرفيين والمتعهّدين والسياسيين ذوي المبادئ السامية والنية الحسنة وهم شديدو الاهتمام بما تبشّر به الشركة. ولم يمض وقتٌ طويل حتى أُعلن عن تحقيق شركة الأوج للطاقة نجاحاً باهراً، بغضّ النظر عمّا إذا كان حقيقياً أم لا، لأنّ الطرحَ البديل لم يكن وارداً على الإطلاق. ومع ذلك ففي النهاية قرَّرت قوانين الفيزياء وحدَها ما هو الصواب وما هو الخطأ.

تأسست شركة الأوج للطاقة أولاً من مجموعة صغيرة من المستثمرين الأغنياء سمعوا بادّعاءات مخترع مغمور عن إيجاده «طريقةً جديدة لتوليد الطاقة الكهربائية». لقد اكتشف المخترع في مخبره الواقع في الطابق الأرضي أن قوانين الفيزياء تتغيّر مع الزمن، فقد لاحظ تغيّراتٍ في شدة قوة الثقالة على مدار الأسبوع خاصة صباح أيام الثلاثاء، حيث وجد أن قوة الثقالة تضعف وبشكل نمطي عند تمام الساعة العاشرة صباحاً من كلّ يوم ثلاثاء. تمثّلت خطّة عمل المستثمرين في استخراج الطاقة من قوة الثقالة المتغيّرة بفضل «ظاهرة يوم الثلاثاء» الغريبة هذه، فباعتبار أنّ قوة الثقالة على سطح الأرض أوهن في يوم الثلاثاء منها في الأيام الأخرى، يمكن عندئذٍ رفعُ كتلةٍ كبيرة ـ مهما كان تركيبها المادي ـ بواسطة رافعة إلى الأعلى بكلفةٍ طاقية أقل ممّا هي عليه في الأوقات الأخرى من الأسبوع. ومن ثم ستعيد هذه الكتلة طاقةً صافيةً أكبر ممّا استهلكته عند رفعها، إذا ما

حرّرناها في يومٍ آخر من أيام الأسبوع.

علينا هنا ذكر بعض الأمور التقنية بإيجاز كإضافة توضيحية. تُقاس قوة الثقالة على سطح الأرض بدلالة g **معدّل التسارع** الذي يختبره (بعد إهمال مقاومة الهواء) أيُّ جسم ـ صخرة مثلاً ـ عندما يسقط من برج بيزا المائل مثلاً. تساوي **القوة** التي يختبرها جسمٌ **كتلته** m على سطح الأرض بسبب جرّ الثقالة حاصلَ جداء الكتلة بتسارع الثقالة أي mg، بينما يساوي تسارع الثقالة على الأرض g ـ كما يعرف أيّ طالب درَسَ الفيزياء في المرحلة الثانوية ـ عشر «وحدات» تقريباً في نظام القياس[1] الذي يعتمد **المتر والكيلوغرام**

---

(1) يتمّ وصف جميع الأشياء في الفيزياء من خلال ثلاثة مقادير فيزيائية أساسية: المسافة والزمن والكتلة. على سبيل المثال نورد **كتلة** عيّنة ما لتحديد **كمية المادة** فيها بغضّ النظر عن تفاصيل مكوّناتها. يمكن لهذه العيّنة أن تكون أيّ شيء: بروتون أو إلكترون أو فيروس أو برج إيفل (Eiffel Tower) أو كوكب المشتري (Jupiter). لا حاجةَ إلى استعمال نوعٍ من الكتل لوصف البروتونات ونوعٍ آخر لوصف الإلكترونات.

نتعامل في الفيزياء غالباً مع مقادير أكثر تعقيداً. على سبيل المثال يُعطى قياسُ مقدار الحركة **بالسرعة** التي يتحرّك بها كائنٌ ما. تعبّر السرعة عن مقدار مسافةٍ مقطوعة خلال مقدارٍ محدّد من الزمن، فتكون السرعة إذاً فاصلاً طولياً مقسوماً على فاصلٍ زمني، ونقول إنّ للسرعة بعداً فيزيائياً هندسياً موافقاً لـ L/T. أمّا التسارع **فهو معدّل تغيّر السرعة في وحدة الزمن**، وبالتالي فبعده الفيزيائي الهندسي هو L/T^2. عندما يتحرّك جسمٌ له كتلة، فإننا نقيس مقدارَ حركته الفيزيائية عبر **اندفاعه** (أو **كمية حركته**)، وهو جداء الكتلة بالسرعة أو ML/T. لدينا كذلك **الطاقة** التي تظهر بأشكالٍ متنوّعة، وبعدها الفيزيائي الهندسي هو حاصل جداء بعد كتلة ببعد سرعة مربّعة أي ML^2/T^2. تعبّر الاستطاعة عن **المعدّل الزمني لتغيّر كمية الطاقة**، فيكون بعدها ML^2/T^3. يُعلِّمنا قانون نيوتن أنّ **القوّة** تقيس **معدَّلَ التغيّر الزمني للاندفاع**، وبالتالي يكون بعدها ML^2/T^3 الفيزيائي الهندسي ML/T^2.

نستخدم عادةً في العلوم واحداً من نظامَين لواحدات القياس: (1) نظام السنتمتر ـ الغرام ـ الثانية أو cgs؛ أو (2) نظام المتر ـ الكيلوغرام ـ الثانية أو MKS. وقد استعملنا عادةً نظام الـ MKS في هذا الكتاب، ولكن هذا مجرّد خيارٍ اخترناه كيفياً. تُقاس الكتلة في نظام الـ MKS بالكيلوغرام، بينما تُقاس المسافة بالمتر والزمن بالثانية (التي تُستخدم كذلك في النظام الآخر). إنّ التحويلات التالية مفيدةٌ من أجل تصوّر الأمثلة التي تمَّ ذكرها: =

والثانية. يعني ذلك أن قيمة g مساوية تقريباً لـ 10 أمتار في مربّع الثانية أو بشكل آخر: 10 م/ثا (يكافئ ذلك 32 قدماً في مربّع الثانية في النظام الإنجليزي للقياس[2]. ويعني ذلك أيضاً أن سرعةَ أيّ كتلة بعد سقوطها لمدة ثانية واحدة ـ مع إهمال مقاومة الهواء ـ تبلغ 10 أمتار في الثانية (أو 32 قدماً في الثانية)[3]. وباختصار تزداد قوة الثقالة مع ازدياد قيمة g.

وفقاً لما ادّعاه المخترع في شركة الأوج، تكون قيمة g كلّ ثلاثاء عند تمام الساعة العاشرة صباحاً ـ ولمدّة بضع دقائق ـ أصغرَ منها في الأيام الأخرى من الأسبوع، ومن ثم فإننا جميعاً سيكون

= 1 متر = 100 سنتيمتر = 3,28 قدم = 1,09 يارد؛ يوافق 1 رطل (باوند) على الأرض كتلةً مقدارها 0,45 كيلوغرام؛ يكافئ 1 كيلوغرام 2,22 رطلاً على الأرض (لاحظ أنّ الرطل يدل على الوزن الذي هو قوّة ML/T2، بينما الكيلوغرام يدلّ على الكتلة M. يتغيّر وزن جسم ما على القمر مقارنةً معه على الأرض، ولكن كتلته تبقى نفسها. أمّا نظام الـ cgs فهو ملَائمٌ للاستعمال، لأنّ كتلة السنتمتر المكعب من الماء عند درجة حرارة الغرفة تساوي 1 غرام). تحتوي السنة على ($3,15\times10^7$) ثانية.

[تساوي درجة حرارة الغرفة تقريباً 20 درجة مئوية، ويساوي الغرام كتلة سنتيمتر مكعب من الماء النقي عندما تكون كثافته أعظمية، ويحصل ذلك عند الدرجة 4 مئوية].

(2) لاحظ أنّ محرّك البحث غوغل يمكن أن يُنجز كثيراً من التحويلات بين الواحدات عبر إلقاء بعض الأسئلة البسيطة. على سبيل المثال إذا فتحنا الموقع www.google.com، ثم كتبنا في نافذة البحث السؤالَ «كم من الأمتار المربّعة يحوي الفدّان (الأكر)؟» (How Many Square Meters per Acre?)، ونقرنا بمؤشّر الفأرة على الخانة المُعلَّمة بحث (Google Search)، فسيظهر لنا الجواب: 1 فدّان = 4046,85642 متر مربّع (1 acre = 4046.85642 Square Meters). وعندما لا يستطيع محرّك البحث هذا إجابةَ سؤالٍ ما، فإنه سوف يحيلنا عادةً إلى مواقع تستطيع ذلك.

(3) لاحظ أنّ النظام الإنجليزي يستخدم **القدم ـ السلج ـ الثانية**، و**السلج** (Slug) هو وحدة كتلة تساوي حاصل قسمة قوّة مقدارها 1 رطل على قيمة g (في هذا النظام) أي تقريباً 32. لا حاجة إلى القول بأنّ قلّةً ضئيلةً لا غير من الفيزيائيين تستخدم هذا النظام الإنجليزي العجيب اليوم.

وزننا أقلّ من المعتاد في أيام الثلاثاء عند الساعة العاشرة صباحاً. لقد تمّ قياس هذا الأثر بواسطة مقياس تسارع الثقالة (مقياس الـ g) الذي صنعه المخترعُ ـ وسجّل براءةَ اختراعه باسم شركة الأوج ـ في المخبر الواقع في الطابق الأرضي، وادّعى بأنه يمثّل طريقةً بالغة الدقة لقياس g.

اشترت شركة الأوج ـ بعد إطلاقها لعرض بيع علني وابتدائي لمليون سهم من أسهمها ـ برجاً عالياً لخزن الماء وخزاناً مائياً ومحرّكاً يعملَ بقوة الماء لتوليد الكهرباء مع إمكانية إدارته بالعكس ليعمل كمضخة. يمكن لبرج الماء العالي فوق سطح الأرض أن يحملَ كمية (أو كتلة) كبيرة من الماء، وبالتالي من خلال صيغةٍ معروفةٍ لأيّ طالب مدرسة ثانوية نستنتج أن **الطاقة الكلية** اللازمة لضخّ الكتلة m إلى أعلى البرج بارتفاع h فوق سطح الأرض هي حاصل جداء m بـ g بـ h أي mgh.

أشار مقياس الـ g في تمام الساعة العاشرة صباح يوم الثلاثاء إلى أن الثقالة ضعفت أو أن قيمة g قد صغرت لتغدو مساويةً لـ 9 وحداتٍ لا غير في نظام الوحدات وهكذا وحيث إنّ الشركة قادرةٌ من خلال خطوط النقل الكهربائي على توفير الطاقة اللازمة لضخّ المياه من الحوض إلى أعلى البرج، فإنه يمكن بسهولة عندها ضخّ الماء إلى الخزّان في أعلى البرج وملؤه (انظر الشكل 2)، ثم جعله يرقد هناك إلى اليوم التالي.

بيّن مقياس الـ g يوم الأربعاء أن شدّة الثقالة عادت لقيمتها الأصلية، ويعني ذلك أن قيمةَ g عادت مساويةً لـ 10 وحدات (القيمة المعيارية) في نظام المتر ـ الكيلوغرام ـ الثانية. تمّ فتح صنبورٍ ليتدفّق الماء من أعلى البرج إلى أسفله عبر أنابيب خاصة ماراً ضمن محرّك شركة الأوج المائي لتوليد الكهرباء وعائداً إلى الحوض. لقد تمّ الآن

استرداد الطاقة الكامنة الثقالية للماء الذي تمّ ضخه لأعلى البرج، وأعيد تحويلها إلى طاقة كهربائية مفيدة. ولكن قيمة g الآن (10 وحدات) أكبر ممّا كانت عليه يوم الثلاثاء (9 وحدات)، وبذلك تكون الطاقة المُستخلَصة من الماء عند سيلانه للأسفل **أكبر** من المصروف الطاقي الأصلي عند ضخّ الماء للأعلى. بالاستناد إلى ذلك ادّعت شركة الأوج للطاقة الكهربائية أنها حصلت من مجمل المنظومة على **مقدارِ كسبٍ صافٍ في الطاقة** مساوٍ لجداء m بـ h بـ (g_{Wed} مطروحاً منه g_{Tues}) أي $mh(g_{Wed} - g_{Tues})$.

الآن باعتبار أنّ الطاقة سلعةٌ لواحِدتِها قيمةٌ بالدولار تحدّدها السوق، فإنه يمكن للطاقة المستَرَدّة أن تعوِّض كلفة الطاقة المستخدَمة من أجل ضخّ الماء إلى البرج، مع توفير قسم إضافي متبقي تستطيع الشركة بيعه بغرضِ تحقيق ربحٍ صافٍ عبر تزويدها لشبكة الكهرباء به. إذاً هذه المنظومة قادرة على تزويد كلّ المدن المجاورة بالكهرباء وبالتالي خدمة قاطنيها. لقد تمكّنت شركة الأوج للطاقة من إنتاج طاقةٍ خالصة بشكلٍ مجّاني اعتماداً على التغيّر الزمني للثقالة، وبهذا تكون قد صنعت ما يُدعى بآلة الطاقة المجّانية التي يمكنها العمل للأبد مولّدةً طاقةً أكثر ممّا تستهلك، وذلك كلّه من دون مقابل(4)!

---

(4) انظر: Robert L. Park, *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud* (New York: Oxford University Press, 2000), pp. 3-14.

من أجل الاطّلاع على بعض أفكار الطاقة المجّانية في الوقت الراهن. يُعرَّف المحرّك دائم الحركة عموماً بأنه آلة تدور إلى الأبد من دون استهلاكٍ أو إصدارٍ للطاقة، أمّا الآلة ذات الطاقة المجّانيّة فهي آلةٌ تنتج فائضاً طاقياً انطلاقاً من لا شيء. انظر: Donald Simanek, «The Museum of Unworkable Devices,» www.lhup.edu, and «Eric's History of Perpetual Motion and Free Energy Machines,» Philadelphia Association for Critical Thinking, www.phact.org

(كلا الموقعَين وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 12 أيار/ مايو 2004).

عندما انتشرت الشائعات في شارع سوق المال (وول ستريت) عن هذا الاختراق، ارتفع سعر سهم شركة الأوج بشكل مذهل. صرّح مديرو شركة الأوج بـ «أنها مسألة وقت لا غير قبل أن ترى منظومات الأوج النور، وتبدأ بالعمل مانحةً الطاقة لكلّ مجتمع المشتركين ومحققةً أرباحاً صافية بالملايين للمستثمرين». عرض كثيرٌ من اليتامى والأرامل مدّخرات حياته وبيضات أعشاشه (أغلى ما يملك) على المصرفيين وسماسرة البورصة لاستثمارها في سندات شركة الأوج المضمونة الربح من دون حاجة إلى تشغيل الذهن. لقد غدت الشركةُ وبشكل مفاجئ محبوبة وول ستريت.

مع ذلك راود الشكُّ أحَدَ مدقّقي الحسابات، فطلب من هيئة الأسهم والصرافة (Stocks & Change Commission) (SCC) استخدامَ مخبرٍ مستقلّ من أجل إجراء اختبارٍ على منظومة شركة الأوج للطاقة. أوجب هذا بشكل خاص إجراءَ العديد من الفحوص والاختبارات الدقيقة على مقياس الـ g الذي بيّن اعتمادَ قوانين الفيزياء على الزمن. حصلت سلطات هيئة الـ إس سي سي على جهاز مقياس الـ g في شهر حزيران/ يونيو، وسلّمته إلى مخبر التجريب الشامل (Universal Testing Laboratory) (UTL). تمَّ الإعلان أن نتائج الاختبار ستُذاع خلال شهر تشرين الأول/ أكتوبر، وأصيبت تجارةُ الأسهم بالكسل عند نهاية فصل الصيف مع انسحاب المستثمرين النشيطين وبقائهم في الكواليس، إذ كانوا ينتظرون نتائج الـ يو تي إل والأخبار التي ستؤكّد حقيقة الاختراق الكبير الذي أنجزته شركة الأوج للطاقة مع مخترعها المغمور ولكن الجريء.

وأخيراً حلَّ شهر تشرين الأول/ أكتوبر، وفي غالب الأحيان يُصبح مالكو الأسهم عصبيّي المزاج في هذا الشهر، كما لاحظ مرّة دليل الاستثمارات العظيم بودنهيد ويلسون (Pudd'nhead Wilson)

عندما قال: «يُعدّ شهر تشرين الأول/ أكتوبر... من أخطر الأشهر للمضاربة في البورصة. أما الأشهر الأخرى الخطيرة فهي تموز/ يوليو، كانون الثاني/ يناير، أيلول/ سبتمبر، نيسان/ أبريل، تشرين الثاني/ نوفمبر، أيار/ مايو، آذار/ مارس، حزيران/ يونيو، كانون الأول/ ديسمبر، آب/ أغسطس وشباط/ فبراير»[5]. عشية الليلة السابقة لاختبار مقياس الـ g الذي انتظرناه على أحرّ من الجمر هبط مؤقتاً سعر سهم شركة الأوج للطاقة عند إقفال المضاربات، إذ إن شائعةً حاقدة انتشرت في أوساط المبادلات تقول إن مخترع جهاز مقياس الـ g اختفى عن الأنظار وغادر البلاد صباح اليوم السابق وهو في عجلةٍ من أمره على متن طيران العين المُحْمَرّة إلى مكانٍ ما في أوروبا الشرقية.

كان مقدراً على نتائج تحليل الـ يو تي قبيل بدء المضاربات في اليوم التالي، فحبس «الشارع» أنفاسه من الخوف، وكان الجو شبيهاً بما يصاحب قرع الطبول مع اقتراب لحظة الإعلان. وأخيراً تمّت قراءة تقرير موظفي الـ يو تي إل، وأُبرق الخبر بسرعة: بيّنت الاختبارات أن مقياس الـ g الشهير لشركة الأوج للطاقة كان يعطي فعلاً قيمةً أدنى من المعتاد عند تمام الساعة العاشرة صباحاً من أيام الثلاثاء، ولكن سبب ذلك كان يعود إلى **خطأٍ في تصميمه!**

بيّن التحليل الدقيق أنه كان يجري فحصٌ لصفارات الإنذار عن الغارات الجوية تماماً في الساعة العاشرة صباحاً من أيام الثلاثاء في المدن المجاورة، ممّا سبّب اهتزازاتٍ صوتية في الدارات الحساسة للآلة، وبالتالي خفضاً ضئيلاً في قيمة الكمون عند قراءة مقياس الـ g.

---

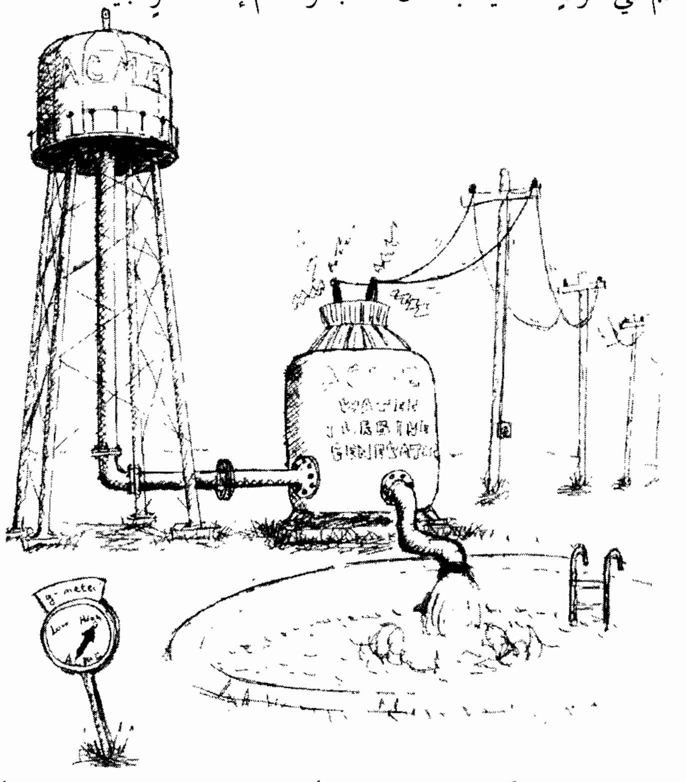
(5) Mark Twain, *The Tragedy of Pudd'nhead Wilson*, from *Pudd'nhead Wilson's Calendar*, chap. 14: Tom Stares at Ruin.

أدّى ذلك إلى إعطاء قيمةٍ خاطئة للمقدار الفيزيائي g، تمّ تفسيره خطأً على أنه نقصانٌ في شدة قوة الثقالة. وجد الموظّفون عند تصحيح هذا الخطأ المنهجي في مقياس الـ g، أنه **لا يوجد البتة أيّ تغيير** في قيمة g في أيام الثلاثاء. أكّد الفاحصون أن قوانين الفيزياء ـ كما بيّنها هذا الاختبار وأيّ تجربة أخرى معروفة ـ لا تبدو متغيّرة مع الزمن. استشهد موظفو مخبر التجريب الشامل في تقريرهم بحادثة اكتشاف المفاعِل النووي الطبيعي في أوكلو قائلين: «بما أن قيمة وحدة الشحنة الكهربائية ـ بينت النتائج التي تم الحصول عليها في أوكلو ـ لا تتغيّر بأكثر من جزء واحد من أصل عشرة ملايين جزء طوال مدةٍ من مرتبة عمر الكون، فمن غير المعقول أن تتغيّر شدة الثقالة بمقدار يتجاوز الـ 10 في المئة خلال فترة أيام العمل في الأسبوع. بالرغم من أن g مقدارٌ فيزيائي مختلف عن الشحنة الكهربائية، فإن نتائج أوكلو تؤكّد عموماً ـ وبشكل قوي ـ أن قوانين الفيزياء ثابتة لا تتغيّر لغايةِ بدقةٍ تتجاوز بكثير الإشارة التي سجّلها مقياس الـ g الخاطئ».

إن منظومة شركة الأوج للطاقة **لا** تُنتج إذاً **أيَّ فائضٍ في الطاقة الكهربائية.** في الحقيقة لا ينجم عن المنظومة إلاّ ضياعاتٌ في الطاقة بأشكالٍ مختلفة، كأن تكون حرارةً أو اهتزازاتٍ ميكانيكيةً أو ضجيجاً أو غيرها من الضياعات الناتجة عن عدم الكمال المفروض قسراً على أيّ منظومة ميكانيكية أو كهربائية. وقوانين الفيزياء لا تتغيّر مع الزمن بل تبقى ثابتة.

علّقت الـ إس سي سي حالاً المتاجرةَ بأسهم شركة الأوج، ولم يتمّ تداول أيّ سهم منها (قانونياً) لعدة أيام، ثمَّ غدت الأيام أسابيعَ والأسابيع تحولّت إلى أشهر. عندما عادت أخيراً محبوبة الوول ستريت إلى المضاربة، لم يتعدّ ثمنُ سهمها ـ الذي كان يحلّق عالياً متجاوزاً الألف دولار مع قصة مرموقة عن الشركة على غلاف **مجلة**

الدعايات (*Blurbes Magazine*) ـ قيمةَ الفلس فقط لا غير. بعد ذلك وعندما فتحت الـ إس سي سي تحقيقاً جنائياً حول القضية، تبيّن أن مخترع مقياس الـ g البائس رغم انخداعه في البدء بالظاهرة التي لاحظها في مخبره في الطابق الأرضي، إلاّ أنه ـ بعد اكتشافه لسببها ـ قام بإخبار المستثمرين المصرفيين في الشركة عنها. لكنّ قيمةَ سهم شركة الأوج للطاقة كان حينها لا يكفّ عن الارتفاع بصورة جنونية، بحيث قرّر أحدهم في غرفةٍ ما مليئة بدخان السجائر عدمَ إفساد أمرٍ جيّد.



الشكل 2: تتكوّن منظومة آلة الاختبار في شركة الأوج للطاقة الكهربائية من برج ماءٍ ارتفاعُه h ومولّد ـ محرّك توربيني مردودُه 100 في المئة وحوضِ تخزينٍ تُضَخُّ مياهٌ كتلتها m منه نحو أعلى البرج عبر تشغيل المولّد ـ المحرّك بالشكل العكسي. هناك أيضاً عند أسفل يسار الشكل المرسوم مقياسُ الـ g الخاص بشركة الأوج الذي يقيس تسارع الثقالة على سطح الأرض.

تبيّن في ما بعد أنّ الموظفين الرئيسيين التنفيذيين والماليين ورؤساء الأقسام وأعضاء مجلس الإدارة ـ الحاليين والسابقين ـ وعدداً غيرهم من كبار المستثمرين في شركة الأوج للطاقة، كانوا قد باعوا كلّ أسهمهم المالية قبل أشهرٍ من إعلان نتائج الـ يو تي إل (وقدّم جميعُهم وقتها أسباباً مشروعة لتصرّفهم). ولكنهم مع ذلك استمرّوا بالتأكيد لمستثمري الشركة أنّ «كلّ شيء على ما يرام، وأنّ الشركة ستنتج كثيراً من الطاقة المجانية في ربع السنة القادم، والمطلوب فقط هو قليلٌ من الصبر!». أنكر موظفو الشركة تماماً أيّ معرفة لهم بمشكلة مقياس الـ g، رغم أن كاتبِ المَحاضِر (الموظّف المالي الذي يجلس في مكتب خلفي) قد زجّ به إلى السجن، لأنه أخطأ في إحدى المرات ومرّر مذكّرة تفيد بأن موضوع مقياس الـ g كان قد تمّ نقاشه في أحد اجتماعات مجلس الشركة.

وتلك كانت نهاية شركة الأوج للطاقة الكهربائية.

إنّ قصة شركة الأوج للطاقة ـ كما قلنا منذ البدء ـ ليست إلاّ حكاية رمزية. وربّما يظن البعض أن هذه القصة غير معقولة، إذ لا يمكن لأيّ مستثمر يحترم نفسه أن يتمّ خداعه وسوقه إلى شراء أسهم مالية بهذه الطريقة التافهة. ولكن واقع الأحوال يقول إنّ عدداً لاَ يُحصى من المحرّكات دائمة الحركة وآلات الطاقة المجانية قد تمّ اقتراحه على مرّ العصور، وإنّ كثيراً من المستثمرين انخدعوا فعلاً بذلك. بل تمّ إصدارُ كثيرٍ من براءات الاختراع لمثل هذه الابتكارات لغاية حتى أواخر القرن العشرين. تباينت مثل هذه المنظومات كثيراً في التفاصيل، ففي القرن التاسع عشر كان يمكن أن تستخدمَ الماء الساقطَ من دِلاءٍ على أحزمةٍ ناقلة فيندفع دلوٌ نحو الأسفل ليسبّب بدوره ارتفاعَ دلاءٍ تُسقِط بعدها كميات أكبر من الماء على دلاءٍ أخرى في الأسفل وهكذا؛ أو كان يمكن لها أن تستخدم الماءَ الذي

يتمّ ضخّه ليحرّك مكابسَ تضخّ بدورها كمية أكبر من الماء الذي يحرّك المكابس وهكذا.

في أغلب الأحيان تتضّمن المنظومات الحديثة للحركة الدائمة أو للطاقة المجانية ظاهرياً تقنياتٍ أكثر تعقيداً، فعلى سبيل المثال، يمكن لها أن تستخدم ظاهرة **التحليل الكهربائي** للماء التي تحطّم ماءَ الصنبور الاعتيادي بأن تمرّر تياراً كهربائياً ضمن جزيء الماء المشهور H_2O ليتفكّك إلى مكوّنَيه الغازيَّين H_2 وO_2. يمكن لـ H_2 وO_2 بعدها أن يتّحدا كيميائياً (يحترقا) في محرّك احتراق داخلي، ممّا يعيد بناء الماء الاعتيادي H_2O بالإضافة لانطلاق طاقةٍ. بالتأكيد إن حادثة التحليل الكهربائي قابلةٌ للتحقيق، وغالباً ما يتمّ إثباتها في تجارب علم الكيمياء في المرحلة الثانوية. لكن لسوء الحظ لقد **أساء** مجتمع المستثمرين **فهمَ** ظاهرة التحليل الكهربائي، وانقادوا أحياناً إلى الاعتقاد بأنّ حرقَ الـ H_2 وO_2 الناتجَين يولّد **طاقةً أكبر ممّا استهلكه التحليل الكهربائي الأصلي للماء**. وهذا ليس صحيحاً البتة! ومع ذلك تمَّ الادّعاء في أوقاتٍ متعدّدة، بأنّ هذه الإجرائية الفيزيائية تمثّل منبعاً لطاقةٍ غير محدودة يمكن تزويدها للسيارات، وأنّها تستطيع أن تولّد الكهرباءَ للأبد وبشكل نظيفٍ.

في سبعينيات القرن العشرين لفتت إحدى هذه الشركات انتباهَ المستثمرين، وارتفع سعر سهمها بصورة مذهلة صباحَ أحد الأيام عند افتتاح المداولات المالية. وصل أحد مؤلّفَي هذا الكتاب (كريستوفر هيل) ـ وكان حينها طالباً يحضّر درجة الدكتوراه في كالتيك (Caltech) (معهد كاليفورنيا التكنولوجي) ـ إلى بناء قسم الفيزياء ليرى ريتشارد فاينمان ـ وهو أعظم فيزيائي نظري في العالَم ـ مستمتعاً بالوضع ومتسائلاً: «كيف يمكن لي أن أستغّل هذا وأبيع كلّ أرصدة الشركة قبل أوانها (أقْصُرها) لتحقيق ربحٍ أكيد»؟.

كان قد تمّ في ذلك الوقت إيقاف التداول بالأوراق المالية للشركة، ولكن يبدو أن بعض «خيارات العرض»(*) كانت لاتزال قيدَ التداول (ممّا مثّل بشكلٍ تقريبي طريقةً مكافئةً لقَصْرِ الأرصدة). تناول فاينمان والطالب الغذاء معاً، وناقشا كيفيةَ حجز مكانٍ في خيارات العرض المذكورة. ولكن لدى معرفة فاينمان باستلزام ذلك لتعبئة طلباتٍ خاصة بشكل كامل مع الحصول على موافقة السماسرة، فعندها قال بصوتٍ صارخ وبشكلٍ قاطع: «هذه فكرة سخيفة ومضيعة للوقت. أنا عائد إلى مكتبي الآن لأقوم بشيء له علاقة بالفيزياء». من الجدير بالذكر أنّ المداولات في الأوراق المالية للشركة استُؤنفت لاحقاً، ولكن سعر السهم لم يسقط إلى مرتبة الفلس عكس ما توقّعناه. وفي الحقيقة لم يعُد السعر أبداً إلى قيمته الأصلية المنخفضة! فقد ارتاب المؤمنون بفكرة الشركة ـ بطريقةٍ ما ـ في صحة الادّعاءات المضادّة لها والقائلة باستحالة تحقيق آلية الحركة الدائمة أو الطاقة المجانية، وانتهت صلاحية خيارات العرض من دون استغلالها. وهكذا يمكننا إذاً التصريح بأنّ البورصة بالتأكيد **لا** تخضع لقوانين الفيزياء.

يمكن بسهولة أن يُصاب المرء بالارتباك والتشوّش هنا، فلو كان لديك منبع للطاقة مثل طاحونةٍ هوائية أو مفاعل نووي، فإنك **تستطيع** أن تحوِّل الماء إلى غاز هيدروجين صاف (بالإضافة للأوكسيجين)، ويمكنك أن تستعمل هذا الهيدروجين كوقود. ولكنك في حقيقة الأمر لا تكون قد قمتَ بأكثر من **استنفاد مجمل الطاقة التي ابتدأت بها** من دون أيّ خلقٍ لطاقةٍ مجانية من العدم، فكما هو الحال عند شركة

(*) حقوق لبيع المدّخرات بسعرٍ متفَّق عليه بغضّ النظر عن قيمتها الفعلية لحظةَ البيع حمايةً من انخفاض الأسعار.

الأوج للطاقة، إنّ أيّ إجرائية لتحويل الماء إلى هيدروجين بهدف توليدِ طاقةٍ مجانية، إنما تمثّل آلةً دائمة الحركة كانت ستُزوّدنا ـ ابتداءً من لا شيء ـ بربحٍ صافٍ في الطاقة يمكن تحويله إلى سيولة نقدية؛ وهذا الأمر لا يمكن تحقيقه إلاّ إذا كانت قوانين الفيزياء متغيّرةً مع مرور الزمن. من أجل الحصول على منبع صافٍ للطاقة، يتوجّب على الطاقة المستخدَمة لتحطيم جزيئات الماء أن تكون أقلّ من الطاقة المستردّة لدى احتراق الهيدروجين والأوكسيجين عند إعادة تشكيل جزيئات الماء، وبالتالي ستكون خصائص جزيئات الماء الابتدائية مختلفةً عنها في جزيئات الماء النهائية. ولكن جزيئات الماء منظومات فيزيائية بسيطةٌ نسبياً، ولها الخصائص نفسها سواء في الجزيئات التي تشكّلت في الكون الموغل في القدم كنواتجَ لانفجارات النجوم الجبابرة أو في جزيئات الماء التي نصادفها في الوقت الحاضر. لا تتغيّر هذه الخصائص مع مرور الزمن، ولا يمكننا ـ بأيّ حالٍ من الأحوال ـ استخلاصَ طاقةٍ صافية من خلال تحطيم الجزيئات ثم إعادة توحيد مكوّناتها ضمن شكلها الأصلي.

في الحقيقة قد تكون (وقد لا تكون) فكرةً جيدةً في السياسة العامة المستقبلية لمجال الطاقة أن يُصنع للسيارات وغيرها من الأشياء وقودٌ من الهيدروجين واردٌ من منبع نظيف ومركزي للطاقة يعتمد التحليلَ الكهربائي للماء. إنّ احتراق الهيدروجين مع الأوكسيجين آمن نسبياً، وهو فعّال ونظيفٌ من حيث إنه لا يلوّث الهواء بمركّباتٍ كربونية. لكننا لم نتوصّل بعدُ إلى تقديرٍ كامل للأثر البيئي العام لمثل هذا الأمر، كما أنه سيستلزم تغييراً هائلاً في البنية التحتية لمجتمعاتنا في ما يتعلّق بالطاقة. سنحتاج أيضاً لتحقيق ذلك الأمر إلى منابع خامّ جديدة للطاقة، فنحن لن نكسبَ أيّ ربحٍ صافٍ من الطاقة بواسطة هذه الإجرائية، بل سنفقد بالتأكيد كميةً منها لأنّ الإجرائية الإجمالية

لا يمكن أن تكون فعّالةً 100 في المئة. وكوننا سنعتمد هذه الفكرة في المستقبل أو لا سوف يتوقَّف بشكلٍ رئيسي على طبيعة المشاكل التي سنتعرّض لها.

لو أمكن للطاقة أن تُنتَج من لا شيء أو أن تختفي أي تتحوَّل إلى لا شيء، لقلنا حينئذٍ إنها غير مصونة. كان من المفترَض أن تكون الطاقةُ الكلية التي استعملتها شركة الأوج من أجل ضخّ المياه إلى أعلى البرج أقلَّ ممّا تستردّه الشركة من طاقةٍ عند تحرير المياه، وهكذا لن تكون الطاقة الكلية محفوظةً إذ إن طاقةً صافية كانت ستأتي من العدَم. لكن في جميع التجارب التي قمنا بها على مرّ التاريخ كنّا نكتشف دائماً أنّ **الطاقة الكلية التي نبتدئ بها تساوي تماماً الطاقةَ الكلية التي ننتهي بها.** إن الطاقة مقدار مصونٌ في الطبيعة، ولقد أجرى عددٌ لا يُحصى من العلماء تجاربَ عديدة جداً تحققّوا فيها من أنّ الطاقةَ الابتدائية والطاقةَ النهائية في أيّ عملية فيزيائية متساويتان دوماً.

إنّ أحد الأسباب التي يمكن أن تصيبنا بالحيرة بخصوص مصونية الطاقة وتجعلنا نتأمّل في إمكانية وجود محرّكات دائمة الحركة أو طاقةٍ مجّانية هو صعوبة تقفّي آثار الطاقة، فهناك في حياتنا اليومية أشياء كثيرة غير مصونة مثل عدد الكائنات الحية على سطح كوكبنا، الأرض، ومثل القيمة الكلية لسوق البورصة المالية. والطاقة كذلك يمكنها أن تظهر في أشكال مختلفة، فهي جلية للعيان في الجسم المتحرّك (طاقة حركية)، ولكنها أقل وضوحاً في جسم ساكنٍ على قمة جبلٍ (طاقة كامنة يمكن تحويلها إلى طاقة حركيّة عند سقوط الجسم). بشكلٍ عام يوجد فقدانٌ للطاقة في أثناء العمليات الفيزيائية يحوّلها عادةً إلى أشكالِ ضياع مثل الحرارة والصوت. يمكن للطاقة أن تضيع عند تشويه شكل الموّاد كأن تتكوّن أغوار وتغضّنات

على سطحها تغيّر من ترتيب وطبيعة الجزيئات في المادة. ويمكن للطاقة أن يتمّ امتصاصها (أو إطلاقها) على شكل طاقة كيميائية مغيِّرةً حالةَ المادة من حالة صلبة إلى سائلة أو من حالة سائلة إلى غازية. ويمكن لها كذلك أن تسيل وتتدفّق إلى خارج منظومة ما محمولةً من قبل الضوء أو أيّ شكلٍ آخر من الإشعاع. وحتى منظومة كبيرة ـ مثل نجم استهلكَ وقودَه ـ يمكن أن تنكمش على نفسها منقِصةً بذلك طاقتَها الثقالية الكامنة التي يتمّ تحويل هيئتها بإشعاعها على شكل ضوء، إلى أن يُستنفَد مجمل الطاقة ويغدو النجم في آخر الأمر قزماً أبيض أو حتى ثقباً أسود. استغرق الفيزيائيون والكيميائيون والبيولوجيون وقتاً طويلاً لكي يدركوا أن مبدأ مصونية الطاقة صحيحٌ دوماً وكليّ الصلاحية، فهو يحكم جميع الظواهر الفيزيائية. حتى الأشكال الحياتية تخضع لهذا المبدأ، فلا وجود لشكلٍ متميّز من الطاقة يخصّ الكائنات الحية، بل كلّ أشكال الطاقة تُقاس باستعمال نفس الوحدات في جميع أرجاء الكون. ولو استطعت تقفّي آثار مجمل أشكال الطاقة وضبطَ حسابات تحوّلاتها بالتفصيل، لوجدت أنّ الطاقة مصونةٌ دوماً في أيّ إجرائية فيزيائية.

ما رأيناه في قصة شركة الأوج للطاقة هو أنّ تغيّر قوانين الفيزياء عبر الزمن يؤدي إلى توقّف صلاحية أحد أهم المبادئ في الفيزياء: مبدأ مصونية الطاقة. لو كانت قوى الطبيعة في لحظةٍ ما مختلفةً عنها في لحظةٍ أخرى، فإنّ مقدار الطاقة المستهلَك في عملية فيزيائية ما سيكون مختلفاً عنه في العملية الفيزيائية نفسها لكن في لحظة مغايرة. ولكننا تعلّمنا من منجم أوكلو ـ أو من غيره من الظواهر المختلفة التي لاحظناها وراقبناها ـ أنّ قوانين الفيزياء **لا** تتغيّر مع مرور الوقت حتى **خلال مقاييس زمنية من رتبة عمر الكون**. وهكذا فإنّ نتيجةَ أيِّ تجربةٍ محدّدةٍ ما تبقى هي هي سواء أجريناها البارحة أم غداً أم قبل

عشر ثوان أم قبل عشرة مليارات سنة أو بعد مئة مليار سنة. إنّ قوانين الفيزياء ـ وبالتالي جميع المعادلات الصحيحة في الفيزياء ـ هي نفسها في جميع الأزمنة عبر تاريخ الكون. ورسوخ وسرمدية هذه القوانين هي حقيقة تجريبية علينا قبولها حتماً.

الآن نستطيع القول إن الأمور التي ذكرناها تعطينا لمحةً عن إحدى أهمّ العلاقات في الطبيعة: إنّ مصونية الطاقة مرتبطةٌ ارتباطاً وثيقاً بحقيقةِ كونِ قوانين الفيزياء لا تتغيّر مع الزمن! يُعَدّ هذا الأمرُ أولَ مثالٍ عن ظاهرةٍ أكثر عمومية وعمقاً في معناها تُدعى باسم نظرية نوثر. يكمن مفتاح فهم هذه النظرية في أنّ عدم تغيّر ـ أو **صمود** ـ القوانين الفيزيائية هو **تناظرٌ مستمرّ** لهذه القوانين. تقول نظرية نوثر إنه من أجل أيّ تناظر مستمر في قوانين الطبيعة يوجد مقدار فيزيائي مصون يوافقه.

ولكن ما هي الطاقة؟

تدور غالبية التحدّيات المهمة التي تواجه الحضارة البشرية اليوم حول موضوع الطاقة. إنّ سبب ذلك بسيط: الطاقة هي السلعة الأهمّ التي نستهلكها، وكثيرٌ من الحروب والصراعات التي نجد أنفسنا غائصين فيها باستمرار تنجم عن حاجتنا للطاقة بشكلٍ وافر ومريح؛ وقد مثّل النفطُ هذا الشكلَ من الطاقة في الأزمنة الحديثة. إنّ الطاقة هي مفتاح التحكّم بالاقتصاد والولوج إلى المستقبل بالإضافة إلى امتلاك القوة السياسية والسلطة، وعلى استخدامها الجيّد يتوقّف مصير البيئة. يمكننا القول إن القضيتَين الأكثر إلحاحاً اللتين تواجهان الإنسان اليوم هما (ربّما بالترتيب) قضية الانفجار السكاني في العالَم وقضية السياسات الطاقية التي يجب اتّخاذها، وهما قضيتان متشابكتان لا يمكن فصل إحداهما تماماً عن الأخرى. تمثّل هاتان القضيتان معضلةً

صعبة من حيث اتّخاذ الخيار الصحيح بين السياسات العديدة التي تتعلق بنوعية حياة الناس، فلا يوجد أيّ دليل على أنّ نظاماً معيّناً من الأنظمة السياسية المتنوعة التي ابتكرها البشر هو الاختيار الأمثل هنا لتحسين تلك النوعية.

الأكثر من ذلك هو أنَّ إدراكنا لمفهوم الطاقة هو بشكل عام سيّئ، ففي كثير من الأحيان نسمع جملاً مثل: «لديه طاقة نفسية كبيرة»، أو «تسيل طاقة الجسم ـ كما لو أنها كمّات الحياة ـ من خلال محارق البلّورات الروحانية إلى الأعلى عبر قمة الهرم» . . . إلخ. تشير أمثال هذه الجمل إلى أشياء لا علاقة لها بمفهوم الطاقة كما يعرفه الفيزيائيون. ترمز عادةً هذه الأشياء إلى مفاهيم زائفة وكاذبة أو إلى استعارات مجازية في أحسن الأحوال. ولسوء الحظ اكتسب مفهوم الطاقة في مناطق عديدة نوعاً من التفسيرات الصوفية قُبلَت من طرف كثيرٍ من الناس.

يمكننا كذلك سماع أحدهم يقول «بعد مرور شهر على العملية الجراحية استعادت طاقتها وعفويتها»، أو «إنه ناقص الطاقة العقلية». واستخدام الكلمات هنا يمثّل نوعاً من الوصف الشاعري لحالة الصحة والحيوية، كما لو كانت الطاقة تعبّر عن النشاط والهمّة والمؤهلات العقلية. إنّ هذا الاستعمال مقبولٌ كتشبيه أو كمقارنة، ولكنه لا يُعدّ مقبولاً كتعريفٍ للطاقة صالح من الناحية الفيزيائية، فبالرغم من أنّ هناك معانيَ كثيرةً للطاقة في لغتنا، فإنّ لها في الفيزياء معنى دقيقاً واحداً لا غير.

مع ذلك يُعتَبر إيجاد تعريفٍ عام للطاقة ليس بالأمر اليسير، رغم أنّ تعريفَ نوع خاصّ منها هو مهمة سهلة بالنسبة إلى أيّ فيزيائي. تُعرَّف **الطاقَةُ** في كتب الفيزياء للمرحلة الثانوية على أنها «القدرة على القيام بعملٍ ما». هذا عظيم! لكنه يستلزم تعريفاً دقيقاً

للعمل. يجب أن تكون التعريفات في الفيزياء واضحةً وجلّيةً وضوحَ وجلاءَ البلّور فلا تقبل أيّ لبس، لأنّ المعيار النهائي لاختبار جودتها هو القدرة على كتابة معادلة رياضياتية تعبّر عنها. تكمن المشكلة هنا في أن مفهوم **العمل** في الفيزياء معقّد قليلاً، فهو «الجداء السلّمي لشعاع القوة بشعاع الانتقال لجسم ما». من أجل كلّ هذا، اقبلْ معنا مؤقتاً أنّ للطاقة تعريفاً واحداً دقيقاً يصلح من أجل جميع أشكالها، ولنقُم الآن بعرضٍ سريع لبعض أشكالها الخاصة (على الأقل كنوع من التعاطف مع مشكلتنا الصعبة في تقديم تعريفٍ شمولي ودقيق).

إنّ **الطاقة الحركية** هي الطاقة الناجمة عن الحركة، وهي تعتمد على كتلة الجسم المتحرّك وسرعته. نحن نحتاج إلى الطاقة من أجل تحريك جسم ذي كتلة، وتزداد هذه الطاقة مع ازدياد كتلة الجسم وكذلك مع ازدياد السرعة التي نرغب في إيصاله إليها (قريباً سنتناول مثال السيارة المتحركة). عندما تحتوي مادةٌ ما على جزيئات أو ذرات تمتلك طاقاتٍ حركية كبيرة ـ كأن تتحرّك بسرعة في اتجاهات عشوائية داخل المادة ـ فإننا نقول إن المادةَ «حارّةٌ»، أما عندما تكون الطاقة الحركية للجزيئات والذرات صغيرةً فإن المادة تصبح «باردة».

الطاقة الكامنة هي الطاقة التي يختزنها جسمٌ ـ أو منظومة ما ـ بحيث يكون قادراً عند تحريرها على تحريك أجسام أخرى. على سبيل المثال، يمتلك النابض المضغوط طاقةً كامنة تقدر على إطلاق نبلة مطاطية صغيرة من دمية على شكل بندقية يلعب بها ولدٌ صغير، أو على رفع باب كراج بالرافعة، أو على تشغيل ساعةٍ قديمة ولأيام عديدة من خلال تعبئتها. إنّ الطاقة في النابض هي في الحقيقة طاقةَ **تشويه وتعديل شكل** شبكة ذرات خلاطة الحديد (الفولاذ) داخل المادة، حيث يتمّ حرفها قليلاً عن موضع راحتها واستقرارها الطبيعي.

هناك أشكال مختلفة للطاقة الكامنة، فمثلاً تمتلك كومة الثلج في قمة الجبل طاقةً كامنة ثقالية جاهزةً دوماً للتحوّل إلى طاقة حركية عند سقوط الكومة. ويحتوي البنزين وغيره من أنواع الوقود على طاقة كامنة كيميائية جاهزة لأن تتحرّر عند إجراء تفاعل الأكسدة الكيميائي (الاحتراق).

يتم إطلاق الطاقة الكيميائية (أو امتصاصها) عندما تخضع موادٌ مختلفة إلى تفاعلاتٍ كيميائية متنوعة مُنتِجة أو مُستهلِكة للطاقة. يعتمد الشكل الدقيق الذي يمكن أن تأخذه الطاقة الكيميائية على طبيعة التفاعل. يقدِّم احتراقُ الفحم أو البترول أو الخشب أو أيّ مادة غنية بالكربون المثالَ الأكثر شيوعاً عن التفاعل الكيميائي. إن الاحتراق هو عبارة عن اتّحاد الكربون بالأوكسيجين (وهو غاز يمكن الحصول عليه بسهولة وبوفرة من الجو). يُعبَّر عن التفاعل الأساسي بالمعادلة $C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q$، حيث ترمز Q إلى الطاقة التي تشمل جسيماتِ الضوء (المعروفة باسم الفوتونات، أو ـ بشكل مكافئ ـ الجسيمات التي تشكّل الإشعاع الكهرمغناطيسي) والحركةَ السريعة (أي الطاقة الحركية) للجزيئات الناجمة عن الاحتراق. بعبارة أخرى، الاحتراق هو عملية يتّحد فيها الكربون مع الأوكسيجين لتشكيل ثاني أكسيد الكربون مع إطلاق طاقة.

تكون السرعاتُ الكبيرة للجزيئات الناجمة عن الاحتراق عشوائيةً، وتُدعى باسم **الطاقة الحرارية**. تصطدم الجزيئاتُ المتحرّكة بسرعة في مدفأةٍ تعمل على الحطب بجزيئات أخرى موجودة مثلاً في الهواء المحيط، ممّا يعطي الأخيرة طاقةً حركية تتسبّب بنقل الحرارة إلى أرجاء الغرفة عبر إجرائية تُدعى بـ **الحمل الحراري**. تتدفّق أيضاً الفوتونات وتنتشر في الغرفة على شكل **إشعاع حراري** مُنتِجةً بدورها حرارة ووهجاً. ينجم الإحساس الممتع بحرارة النار بالقرب من

المدفأة عن هذا الوابل السريع من الفوتونات وجزيئات الهواء المتحرّكة.

أما **الطاقة الكهربائية** فهي شكلٌ آخر للطاقة. إنها في أبسط أشكالها طاقةٌ حركية لتدفّق الإلكترونات (أي للتيار الكهربائي) عبر سلكٍ ما، أو عبر سوائل خاصة، أو في المكان الخاوي كما هو الحال في أنابيب التخلية (مثل أنبوب الأشعة المهبطية أو صمّام شاشة التلفاز) أو مع إلكترونات مسرّع الجسيمات. إذا كانت **المقاومة الكهربائية** للسلك عالية، اصطدمت الإلكترونات بذرّات السلك فاقدةً طاقتَها ومسبّبةً تحرّكَ الذرّات. يصبح السلك عندها حارّاً كما في محمصة الخبز أو في مشواة الفرن الكهربائي. تُدعى هذه الظاهرة بالمقاومة الكهربائية، وهي تؤدي إلى ضياع الطاقة الكهربائية. الأمر الدقيق هنا ـ من أجل تقفّي ما يحدث للطاقة الكهربائية ـ هو أن الإلكترون «يُشعّ» أو **يُصدر** فوتوناً (جسيم الضوء) من خلال الإجرائية $e \to e' + \gamma$، حيث طاقة الإلكترون e' بعد إصدار الفوتون γ أقلّ من طاقة الإلكترون e' قبل الإصدار، بينما يحمل الفوتون الصادر بعد خلقه مقداراً من الطاقة[6]. يمكن للتفاعل أن يحدث بالشكل المعاكس $\gamma + e \to e'$، حيث **يمتص** الإلكترون الابتدائي e فوتوناً تزول طاقتُه ليكسبَها الإلكترون النهائي e'. إنّ هذا هو التفاعل الأساسي في الطبيعة الذي يعرّف الكهرمغناطيسية، وسنجد في آخر المطاف أنه ينجم عن تناظر أساسي موجودٍ في الإلكترونات والفوتونات. يمكن للفوتونات أن تُخزَّن بشكلِ «حقلٍ كهرمغناطيسي»، كأنّه حساءُ

---

(6) إنّ ما يحدث حقيقةً في الإجرائية الفيزيائية أمرٌ أكثرُ تعقيداً بقليل. لابدّ من وجود جسيماتٍ أخرى في حادثة الصدم من أجل حفظ مقدارَي الطاقة و**الاندفاع** كليهما. ومع ذلك يُعتبَر إصدار الفوتون أو امتصاصه من قبل الإلكترون العمليةَ الأساسيةَ في الإلكتروديناميك. سنعود إلى مناقشة هذا الأمر في الفصل الحادي عشر.

فوتونات يحوي طاقتَها. وهكذا فإنّه من الصعب تقفّي ما يحدث للطاقة في العمليات الأساسية للكهرباء والمغناطيسية، حيث تنتقل باستمرار وفي الاتجاهين بين الإلكترونات والفوتونات. وجديرٌ بالذكر أنّ الطاقة الكيميائية عندما نتفحّصها مجهرياً ليست إلاّ طاقةً كهربائيةً ضمن الذرّات والجزيئات.

يستلزم النشاط البشري ـ وفي الحقيقة الحياة البشرية برمّتها ـ استهلاكَ الطاقة. من المؤكَّد أنه لو كانت لدينا موارد لامتناهية في الكبر من الطاقة وكانت لها أشكال مناسبة، لأمكننا حينها ـ إذا ما ضاق بنا المكان على كوكبنا ـ أن نغادرَه ببساطة إلى كواكب أخرى نجعلها قابلةً للحياة، أو أن نُفرغ الكويكبات ممّا في داخلها لِنقطنَها كسكّان مغاراتٍ كونية. سيكون في استطاعتنا عندئذٍ أن نحوّل كوكب المريخ إلى كوكب جميل مثل الأرض، أو أن نجرّه إلى مدارٍ (مريخِ لنا) أكثر قرباً من الشمس لنُسقِطَ عليه مذنّبات (مكعبات كبيرة من الجليد) تُكسِبُه المحيطات. يمكننا أيضاً في أحوالٍ كهذه أن نخلق غلافاً غازياً للمريخ من خلال عمليات كيميائية متنوعة يثيرها مثلاً انصهارٌ نووي. يُعتبَر هذا الوضعُ المثالي بمثابة مشروع نهائي لـ «مكان إقامة البشرية»، وهو في مجمله يتعلّق بتوفّر الطاقة وبمدى البراعة في استخدامها إضافةً إلى الوقت اللازم لذلك. وهكذا يمكن ـ من ناحية المبدأ ـ لعدد البشر أن يصبح كبيراً إلى الدرجة التي نريدها، شريطةَ وجود الطاقة اللازمة لجعل الكواكب الأخرى صالحةً للحياة.

للأسف الشديد نحن لا نملك تلك الإمكانيات في الوقت الحاضر ولا حتى في المستقبل المنظور. وعندما يزدحم كوكب الأرض بالسكان، فإنهم يخلقون مشاكلَ عويصة تتعلّق بالحاجة إلى الطاقة. نعتمد في الوقت الحاضر من أجل توفير الطاقة على حرق الكربون بشكلٍ رئيسي. لكنّ حرق الكربون تنجم عنه نواتج الاحتراق

من ثاني أكسيد الكربون وغيره من غازات النفايات التي تصدر مثلاً عند احتراق البنزين في السيارات. تسمح هذه الغازات المحتوية على الكربون والموجودة في الجو لفوتونات ضوء الشمس المرئي ذات الطاقات العالية بالمرور من خلال الغلاف الجوي من دون عائق. أمّا فوتونات الإشعاع الحراري الغزيرة ذات الطاقات المنخفضة التي تُخلق عند تسخين ضوء الشمس لسطح الأرض، فيتمّ امتصاصها من قبل هذه الغازات المسماة بغازات الدفيئة. يسبّب ذلك احتجازاً للطاقة، يسخّن بدوره الكوكب بمجمله. تفضي فعالياتُ ستة مليارات من الناس (سيقارب العددُ خلال هذا القرن مقدار العشرة مليارات) إلى خلق أثرٍ بيئي يهدّد بتغييرٍ مناخي عامّ، وذلك من خلال إنتاجها لهذه الغازات عبر الاحتراق وإطلاقها إياها ضمن الغلاف الجوّي. إنّ قيامنا بحرق الوقود الحجري المحتوي على الكربون قد يسبّب إذاً تغييراً في المناخ العام لا يمكن التنبّؤ بخطورته. والأدهى من ذلك هو أننا نقود أنفسنا عبر هذا الفعل إلى خيبة أمل أو مصيبة أخيرة، تتمثّل بعدم توفّر ما يلزمنا من طاقة عندما ينفد مجمل الوقود الحجري الكربوني، وهذا الأمر يمكن أن يحدث خلال القرن الحالي[7].

كما ذكرنا سابقاً، الطاقة مفهومٌ معرَّفٌ بشكل دقيق في الفيزياء، وهي مفهوم مفيد لأنها مصونة خلال مختلف العمليات. إذا كان لدينا صندوقٌ كبير تجري بداخله كلّ الأمور الممكنة، مثل انضغاط النوابض وشدّها أو تفاعلات المواد الكيميائية أو احتراق الأجسام أو تفكّك النوى الذرية وانحلالها وهلمّ جرّاً، فإنّ هناك مقداراً واحداً يبقى ثابتاً خلال كلّ هذه العمليات: إنه **الطاقة الكلية**.

(7) David Goodstein, *Out of Gas: The End of the Age of Oil* (New York: W. W. Norton, 2004).

لنأخذ بعين الاعتبار ـ كمثالٍ بسيط عن الطاقة الحركية ـ حركةَ جسمٍ اعتيادي مثل السيارة. لنفترض أن كتلة سيارة صغيرة تبلغ نموذَجياً 1000 كلغ تقريباً[8]، وأنها تتحرّك في الطريق العامة بسرعة 60 ميلاً في الساعة، أي تقريباً 30 متراً في الثانية[9]. يقول الفيزيائيون عندها إنّ للسيارة **طاقة حركية** ـ أي طاقة متمثلة بحركتها ـ مساوية لـ 450000 وحدة طاقة، ويحصلون على هذا الرقم كحاصل جداء 1/2 بكتلة السيارة مقدرة بالكيلوغرام بالسرعة مقدرة بالمتر في الثانية بالسرعة مرة أخرى مقدرة بنفس الوحدة[10]. يُقدَّر الجواب عندها

---

(8) كما ذكرنا سابقاً إنّ كتلةَ كائنٍ ما هي مقياسٌ لكمية المادة في هذا الكائن. يبلغ **وزن** السيارة ذات الكتلة المساوية لـ 1000 كلغ على سطح الأرض 2200 رطل أي أثقل بقليل من طن [يقصد المؤلِّفان هنا وحدةَ الطن المُستعملة للوزن في أميركا الشمالية والمساوية لـ 2000 ليبرة (باوند أو رطل) أو 907,19 كلغ ثقلي واحد]. يعبّر الوزن عن **قوة الثقالة** التي يشعر بها الكائن على سطح الأرض. لذلك يجب الانتباه إلى أنّ الأرطال والأطنان ـ بخلاف الكيلوغرامات ـ **ليست** واحدات كتلة! تزن نفس السيّارة على سطح القمر 370 رطلاً لا غير مع أنّ كتلتها تبقى 1000 كلغ. كما تبقى كتلة السيّارة مساويةً لـ 1000 كلغ أثناء السقوط الحرّ، بينما يصبح وزنها معدوماً. في الفيزياء علينا نسيان مفهوم الوزن والتفكير **فقط** بدلالة الكتلة (انظر الهامش رقم 1).

(9) من أجل الحصول على تقريبٍ للسرعة مقدَّرٍ بالمتر في الثانية قسِّم السرعةَ مقدَّرةً بالميل في الساعة على 2 فتحصل على تقديرٍ تقريبي. [يوافق هذا التقريبُ في الحقيقة تحويلَ السرعة مقدَّرةً بالميل البحري في الساعة إلى متر في الثانية، حيث يُساوي **الميل البحري** تقريباً 1,8 كلم]. أو اذهب إلى www.google.com واكتب 60 ميلاً في الساعة (60 Miles per Hour)، ثم انقر على الخانة المُعلَّمة «بحث Google Search» فيظهر المقدار (26,8224 m/s) الذي نقرّبه إلى 30 متراً في الثانية. على امتداد صفحات هذا الكتاب سنستخدم «تقديرات الفيزيائيين التقريبية» من أجل حساب المقادير؛ وأفضلُ شيءٍ يمكن للمرء فعله من أجل فهم العالَم الفيزيائي (أو حتى العالَم الاجتماعي الاقتصادي من أجل هذه الحاجة) هو القدرةُ على إجراء ما يُعرف باسم تقدير مرتبة العِظَم للأشياء.

(10) نستخدم هنا الصيغة البسيطة التي تعبّر عن الطاقة الحركية لجسم ما في الفيزياء النيوتنية: $E = Mv^2/2$. من أجل حساب E علينا دوماً استخدام نظام واحداتٍ بشكل متّسقٍ خالٍ من التناقض الداخلي، ويُعدّ نظامُ الـ MKS واحداً من أنسب نظم واحدات القياس. انظر الهامش رقم 1.

بوحدةٍ خاصة للطاقة تُدعى بـ **الجول**، عندما نستخدم واحدات المتر والكيلوغرام والثانية أي عندما نستخدم نظام الـ م. ك. س (MKS) لوحدات القياس. سُمّيت وحدة الطاقة في نظام الـ م ـ ك ـ س بالجول نسبةً إلى العالِم بريسكوت جول (Prescott Joule) فيزيائيّ القرن التاسع عشر الذي أمضى الكثير من الوقت وهو يدرس ويقيس الطاقةَ خاصةً عندما تتعلّق بالحرارة والثرموديناميك (ابتكر جول كذلك إجرائية اللحام بالقوس الكهربائية). إنّ التصريح بأنّ سيارتنا تمتلك طاقة حركية مساوية لـ 450000 جول هو تعبيرٌ علمي دقيق حول حركة السيارة وطاقتها الحركية.

لنتناول لغرض المقارنة منظومةً فيزيائية مختلفة تماماً وأكثر غرابةً نوعاً ما: حركة نبضة البروتونات في تيفاترون الفيرمي لاب (مخبر فيرمي) (Fermilab Tevatron) وهو مسرّع الجسيمات ذو الطاقة الأعلى في العالَم في الوقت الحاضر. تحتوي النبضة في التيفاترون على حوالي ثلاثة تريليونات بروتون، وهذا يقارب عدد الذرات في خلية حية واحدة. يتمّ تسريع النبضة حتى تصل إلى سرعة 99,9995 في المئة من سرعة الضوء. لا يمكننا استعمال الصيغة البسيطة التي ذكرناها أعلاه عند مناقشة حالة السيارة من أجل حساب طاقة نبضة البروتونات، لأنّ تلك الصيغة تَنتُج عن فيزياء غاليليو ونيوتن المسمّاة بالـ «الفيزياء التقليدية»، وتتوقّف صلاحيتها عندما تتحرّك الأجسام بسرعةٍ قريبةٍ من سرعة الضوء. لحسن الحظ يعرف العلماء كيفية الحساب في هذه الحالة الأخيرة، فهم يستخدمون هنا نظرية النسبية الخاصة لإينشتاين، ويمكنهم بفضلها حساب طاقة نبضة البروتونات بدقة.

وهكذا حتى الأشياء البعيدة عن تجاربنا اليومية ـ مثل نبضة البروتونات المتحرّكة بسرعةٍ تقارب سرعة الضوء ـ تمتلك قيمةً

واضحةً للطاقة لا لبس فيها، فالنبضة التي وصفناها تمتلك طاقةً تُقدَّر (باستخدام نظرية إينشتاين) بـ 450000 جول، أي نفس قيمة الطاقة الحركية للسيارة التي تتحرّك على الطريق العام بسرعة 60 ميلاً في الساعة! إن الطاقةَ مقدارٌ فيزيائي معرَّفٌ بشكل واضح لا غموض فيه، وهي تصف كلّ الظواهر في الكون، ولها دوماً معنى دقيق. والطاقة مصونة في جميع العمليات الفيزيائية، فلو توفّرت لدينا مردودية كاملة مثالية لتحويل الطاقة، لاستطعنا تحويل طاقة نبضة التيفاترون من أجل زيادة سرعة سيارة نموذجية وجعلها تبلغ 60 ميلاً في الساعة، والعكس بالعكس.

لقد بيّن لنا مثال شركة الأوج للطاقة الكهربائية أنّ الطاقة تُعتبر سلعةً وبضاعة. والطاقة لا تُخلَق ولا تفنى؛ بل تتحوّل فقط من شكلٍ إلى آخر، ولكن عملية التحويل هذه ـ في حدّ ذاتها ـ تكون دوماً غير تامّة. في الحقيقة إنّ علم الثرموديناميك كلّه ـ وهو فرعٌ مهم من علوم الفيزياء ـ تمَّ ابتكاره وتطويره من أجل التعامل مع قضايا مصونية الطاقة وعدم الكمال الموجود أصلاً في أيّ عمليةِ تحوّلِ طاقي. يحوّل **المحرّك** شكلاً من أشكال الطاقة (عادةً طاقة حرارية أو كيميائية) إلى شكلٍ آخر (طاقة حركية غالباً) من أجل تحريك الأشياء. لا تخلق المحرّكات أبداً طاقةً زائدة صافية، بل يضيع قسمٌ من الطاقة دوماً فيها بسبب عدم الكمالية. لقد برهن الفيزيائيون على استحالة وجود محرّك فعّال بمردودية مثالية 100 في المئة (راجع المناقشة عن كفاءة آلة كارنو (Carnot) وعن تاريخ الثرموديناميك في الملاحظة الختامية 7). لقد ادّعت شركة الأوج بأن محرّكها له مردودية 110 في المئة، إذ إنه حسب ادّعائها ينتج من الطاقة أكثر ممّا يستهلك منها.

يُدعى المعدّل الزمني لتوليد الطاقة أو استهلاكها أو تحويلها بـ**الاستطاعة**. من الممكن تخيّل الاستطاعة كنوعٍ من السرعة، إذا

تخيّلنا الطاقة كنوعٍ من المسافة. إذا أردتَ إجراءَ رحلةٍ إلى مكانٍ ما فإنك ستحتاج إلى قطع مسافة معيّنة، أمّا مدة الرحلة فتعتمد على سرعتك، فكلّما ازدادت السرعة نقص الزمن اللازم لإنجاز الرحلة. بشكلٍ مشابه، لنفترض أنك ترغب باستهلاك مقدار معيّن من الطاقة لإنجاز مهمة ما، كأن تجزّ الحشيش الأخضر في حديقة بيتك. يحدّد مقدارُ السرعةِ التي يجب أن تُنجزَ بها المهمةَ مقدارَ الاستطاعة التي تحتاجها، أي المعدّل الزمني لاستهلاكك للطاقة، وكلما كبرت الاستطاعة نقص زمن إنجاز المهمة. لاحظ أن الاستطاعة ليست مقداراً ثابتاً أو مصوناً، لأننا يمكن أن نسرّع أو نبطّئ المعدّل الزمني الذي ننجز به المهمة. من ناحية أخرى، تبقى الطاقة الكلية مصونة وثابتة مثلها في ذلك مثل المسافة الكلية التي يجب قطعها في رحلةٍ ما.

لنتساءل الآن ما هو مقدار الاستطاعة التي تستهلكها السيارة ذات الكتلة النموذجية المساوية لـ 1000 كيلوغرام والتي تسير على طول الطريق العام؟ هناك طريقة لتقدير ذلك عبر جعلك السيارةَ تسير مثلاً بسرعة 30 متراً في الثانية (60 ميلاً في الساعة) على الطريق (تأكّد من أنك الوحيد في الطريق في أثناء التجربة التي يجب أن تُجريها بحذر شديد!)، فإذا رفعتَ قدمك عن دواسة البنزين، وتركتَ السيارة تسير وحدها (طبعاً مع أخذ الحيطة والحرص على الابتعاد عن أي حركة سير!)، فعليكَ أن تقيس كم من الوقت بالثواني يلزم لكي تنخفض سرعة السيارة إلى 25 متراً في الثانية (50 ميلاً في الساعة)، ولنفترض أن نتيجة القياس كانت 10 ثوانٍ. تبلغ الطاقة عند قيمة السرعة الدنيا هذه حاصلَ جداء 1/2 بـ 1000 كيلوغرام بـ 25 متراً في الثانية بـ 25 متراً في الثانية، ويعطي ذلك 312500 جول. يعني ذلك أن السيارة فقدت 450000 منقوصاً منها 312500 أي

137500 جول من طاقتها الحركية. وحيث إن السيارة قد تباطأت خلال عشر ثوان، فإنها تكون قد خسرت طاقتها بمعدّل 137500 جول مقسومةً على 10 ثوانٍ أي بمعدّل 13750 جولاً في الثانية. يكافئ ذلك استطاعةً قيمتها 13750 **واط** (أو 13,75 **كيلوواط**). إنّ **الواط** ـ وقد سمّي كذلك نسبةً إلى جيمس واط (James Watt) مخترع المحرّك البخاري ذي المكبس ـ هو وحدة قياس الاستطاعة.

لقد حسبنا المعدّل الزمني لاستهلاك الطاقة، أي الاستطاعة المُستهلَكة، عندما تسير السيارة بسرعة 30 متراً في الثانية (أي 60 ميلاً في الساعة). على محرّك السيارة إنتاج مثل هذه الاستطاعة عبر حرقه للوقود وذلك من أجل الإبقاء على حركة السيارة، وهي تكافئ تقريباً الاستطاعة التي يستهلكها 137 مصباحاً كلٌّ منها استطاعته مئة واط[11].

---

(11) يمكنك بنفسك القيامُ بهذه التجربة الصغيرة مستخدماً سيّارة دفع رباعي س ـ ف ـ ي (Sport Utility Vehicle) ومقارناً النتيجةَ التي تحصل عليها مع حالة سيّارة صغيرة أو درّاجة نارية، ومن أجل ذلك ستحتاج إلى معرفة كتل هذه السيّارات. على سبيل المثال إذا ذهبنا إلى www.new-cars.com فإننا نجد أنّ هناك سيّارةً صغيرةً بخمس سرعات (خمسة أوضاع في علبة السرعة) يتمّ التنقّل بينها بشكل يدوي (غير أوتوماتيكية) وزنها 2590 رطل (باوند)، أي ـ بالتقسيم على 2,2 ـ تبلغ كتلتها 1177 كلغ (من دون اعتبار وزن السائق ولا الوقود). وجدنا عند إجراء التجربة أننا استغرقنا عشر ثوانٍ للتباطؤ من 60 ميل\سا (60 mph) إلى 50 ميل\سا (50 mph) في طريق الأوتوستراد الخالي، وبالتالي كانت الاستطاعة المستهلَكة للسيّارة 16100 واط أو 16 كيلوواط [نستخدم هنا التقريب المذكور في الملاحظة 9، ومن معرفة أنّ الاستطاعة تساوي حاصل قسمة تغيّر الطاقة على الزمن، وبأخذ تعبير الطاقة الحركية $E=Mv^2/2$] مقدّرةً في نظام الـ MKS نجد المطلوب كما يأتي:

$$\frac{\frac{1}{2}\times 1177\times\left(30^2-25^2\right)}{10}\approx\frac{\frac{1}{2}M\left(v_{initial}^2-v_{final}^2\right)}{T}].$$

الآن يحتوي غالون البنزين على حوالي 110000000 (110 مليون) جول من الطاقة الكيميائية، وتستهلك سيّارتنا الصغيرة عندما تكون سرعتها 60 ميلاً في الساعة ـ أو (1/60) ميلاً في =

يمكن لنا أن نتساءل: «إلى أين ذهبت تلك الطاقة المفقودة؟». إذا سألت هذا السؤال، فإنك تكون فعلاً قد تعلّمت الدرسَ المهمّ عن الطاقة: **الطاقة محفوظة ولا يمكن خلقها أو إفناؤها**، فلابدّ إذاً من أن تكون قد ذهبت إلى مكانٍ ما. في مثال السيارة، يتمّ فقدان الطاقة الحركية من خلال الاحتكاك بين الأجزاء الميكانيكية لتتحوّل إلى تسخينٍ للمحرّك، أو من خلال الطاقة الصوتية التي تصدرها السيارة فتذهب إلى المحتوى الطاقي للهواء المحيط بالسيارة في أثناء سيرها، إضافةً إلى طاقة التسخين والانضغاط وتشويه الشكل للإطارات في أثناء دورانها. في الواقع يتحوَّل القسم الأكبر من الطاقة الضائعة إلى حرارة تسبّب ازدياد قيم السرعات لجزيئات الماء (المبرِّد للمحرّك) ولجزيئات الإطارات والطريق وأمثالها. وبما أن هذا كلّه عبارة عن حركة عشوائية مشوَّشة للجزيئات، فإنّ استرداد هذه الطاقة بشكل مفيد هو افتراض مستحيل التحقيق.

نحن أيضاً ككائناتٍ حيّة يمكن أن نُعتَبر مثل المحركّات، فأجسامنا تستهلك الطاقة كي تحافظ على عمليات الاستقلاب فيها وبالتالي على حياتنا. نقيس الطاقةَ هنا بـ «حريرات الطعام» والتي يُرمز لها عادة بالحرف الكبير C: الحرف الأول من كلمة **حريرة** بالإنجليزية (Calorie). يأكل الشخص النموذجي (النحيل) في

= الثانية ـ مقداراً قدره: 16000 واط \ (1\60 ميل\ثا)= حوالي 1 مليون جول\ميل [تذكّرْ أن الواط مكافئ للجول في الثانية]. إذا كان محرّكنا فعّالاً بمردود 100 في المئة، تقطع سيارتنا عندها مسافة قدرها: (110 مليون جول\غالون) \ (1 مليون جول\ميل) أي حوالي 110 أميال في الغالون. مع ذلك يخبرنا مؤشّرُ المسافة التي يسمح الغالون بقطعها مقدّرةً بالأميال بأنّ القيمة هي 35 ميلاً في الغالون فقط، وبالتالي نجد أنّ فعاليّة سيّارتنا لا تتعدّى الـ 32 في المئة. يمكن لمحاولتك إجراء هذه التجربة بواسطة سيارة دفع رباعي أو دراجة نارية أن توضّح لك الاختلافَ في استهلاك البنزين بين هذه المركبات، وهكذا يُفسِّر سببُ دفعِكَ أنتَ أو جارِكَ لمقدارٍ كبيرٍ من المال عندما توقف سيّارةَ الدفع الرباعي التي تقودها من أجل تزويدها بالبنزين.

الولايات المتحدة ما يعادل 2000 حريرة في اليوم. لكي نحوّل ذلك إلى جول فإننا نضربه تقريباً بالعدد 4200؛ وبالتالي يستهلك الإنسان العادي النحيل حوالي 8400000 أو 8,4 مليون جول من الطاقة كطعام يومياً. يوجد 24 ساعة في اليوم و60 دقيقة في الساعة و60 ثانية في الدقيقة، ويعني ذلك أن اليوم يحتوي على 86400 ثانية. ومنه نستنتج أنّ الشخص العادي يستهلك الطاقةَ أو يحرق ما يكافئها طاقياً بمعدّل وسطي يبلغ (8,400,000/86,400 = 97 watts). وهذا يعني أنّ أيّ واحد منا - ككائنٍ حيّ يقوم بأعمال وظيفية واستقلابية - يكافئ تقريباً من منظور استهلاك الاستطاعة الاستقلابية مصباحاً كهربائياً واحداً استطاعته 100 واط.

أزمة الطاقة وشيكة الوقوع

إنّ غالبية الأميركيين يستهلكون في حياتهم اليومية طاقةً أكثر بكثير من الـ 100 واط الضرورية للبقاء على قيد الحياة. وسطياً يتمّ استهلاك حوالي 3000 واط (أي طاقة بمقدار 3000 جول في كلّ ثانية[12]) بشكل مستمر في المنزل. يشمل ذلك الأضواء الكهربائية

---

(12) يُعطى هذا المقدار عادةً بالـ (BTUs) (British Thermal Unit) وهي وحدة أخرى للطاقة. يبلغ استهلاك الطاقة السنوي في الولايات المتحدة في الوقت الحاضر حوالي 100 كوادرليون (10^{15} BTUs) أو ما يعادل مجموع (10^{17} BTUs) (انظر مثلاً الموقع الإلكتروني لمديرية الطاقة في الولايات المتحدة (www.eia.doe.gov) (وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 16 تموز/يوليو 2004). تساوي البي تي يو حوالي 1000 جول؛ وبالتالي يتمّ استهلاك 2010 جول في الولايات المتحدة في السنة. هناك حوالي 300 مليون (10^{17} BTUs) مواطن أميركي وحوالي 30 مليون ($3x10^7$) ثانية في السنة، فيكون معدّل الاستهلاك الطاقي للمواطن الأميركي حوالي: /10^{20}) ($3x10^8x3x10^7$watts)، والمساوي تقريباً لـ 10000 واط. نعطي عادةً القيمةَ التقريبية 3000 واط لاستهلاك الشخص في منزله أو في حياته اليومية، ويفوق هذا بحوالي الخمسة أضعاف معدّلَ الاستهلاك الطاقي للشخص في العالَم.

وأجهزة التدفئة والثلاّجة ومكيّفات الهواء وجهاز التلفاز. .. إلخ، إضافةً إلى ذلك يستهلك الأميركيون حوالي 10000 واط **لكلّ شخص**، عندما نشمل بحساباتنا السيارات والشاحنات والطائرات والمصانع والضياعات الطاقية في أثناء نقل الكهرباء وإنارة أبنية المكاتب وأساطيل حاملات الطائرات الكبيرة (التي قد تدخل في معارك حربية من أجل ضمان التدفّق التجاري للنفط الذي يُحرَق لإنتاج قسم من تلك الاستطاعة). يفوق معدّلُ استهلاكِ الاستطاعة لكلّ شخصٍ في أميركا المعدّلَ العالَمي بحوالي خمسة أضعاف. ويمكن إنقاص هذه القيمة بشكل محسوس من خلال إيجاد تقنيات أنجع وإحداث تغيير في السلوك والتصرّفات.

لغرض المقارنة نذكر أنّ الشمس تنتج استطاعةً وسطيةً تساوي تقريباً 100 واط في كلّ متر مربّع من سطح الأرض خلال يوم مشمس. وبالتالي سنحتاج وسطياً إلى لاقط شمسي مردوده 10 في المئة ومساحة سطحه 300 متر مربّع ـ أي حوالي مساحة سطح سقفِ كبير ـ من أجل كلّ منزلٍ في مجتمعنا، حتى نحصل من الشمس على كامل الاستطاعة التي نحتاج إليها حالياً. إنّ مردود مثل هذه اللواقط الشمسية في الوقت الحاضر أقلّ من 10 في المئة، إضافةً إلى أنها مكلفة جداً، ولكنّ هناك جهوداً جدّية حالياً لجعلها أكثر اقتصادية. إذا استطعنا العيش ضمن توازنٍ طاقي، حيث نستهلك من الطاقة مقداراً لا يزيد عمّا تزّودنا به الشمس منها، وحيث لا ننتج أيّ نفاياتٍ سامّة خلال هذه الإجرائية، فإننا نكون حينها قد حللنا مشكلة الطاقة. ولكن الطاقة الشمسية قد لا تكون ناجعة في مجتمع يستهلك الطاقة بالمعدل الذي يستهلكه المجتمع الأميركي لكلّ شخصٍ وفي كلّ يوم.

ماذا عن القدرة الكهربائية المائية وأمثالها من الأمور التي تعتمد على خزن الطاقة الثقالية كالبِرَك المدّ ـ جزرية؟ تمتلئ البركة المدّ ـ

جزرية بالماء خلال المدّ العالي، ثم تجفّ خلال الجزر. تشبه فكرةُ عمل البِرْكة مبدأَ شركة الأوج للطاقة، ولكنها تستخدم المدّ والجزر كمصدرٍ للطاقة. يمرّ الماء المنسحب داخل مولّدات توربينية لإنتاج الكهرباء، ولكن لسوء الحظ تبيّن الحسابات أنّ مساحةَ البركة المدّ ـ جزرية يجب أن تكون هائلةً من أجل توليد طاقةٍ كافية تفي بحاجات مدينةٍ متوسّطة.

لنقُمْ بإجراء مِا يُدعى بـِ «تقدير مرتبة العِظَم». لنفترض أننا استملكنا على شاطئ المحيط في الولايات المتحدة منطقةً كبيرةً بطول 1000 كيلومتر (10^6 متر)، وقمنا ببناء «حوض مدّ ـ جزري» بعرض 10 كيلومتر (10^4 متر)، أي مساحته تقارب 10000 كيلومتر مربّع (10^{10} متر مربّع)(*). سنفترض أن كمية الماء التي تدخل الحوض المدّ ـ جزري في الدورة اليومية توافق تغيّراً في ارتفاع الماء مقداره 1 متر، وبالتالي يكون حجم الماء في الحوض 10 مليارات متر مكعب (10^{13} متر مكعب). إن كتلة هذا الماء تساوي 10000 مليار كيلوغرام (10^{13} كيلوغرام؛ لأن كتلة سنتمتر مكعب من الماء هي غرام واحد، ولدينا حاصل جداء 10^{10} متر مكعب بـ 10^6 سنتمتر مكعب في المتر المكعب أي 10^{16} غرام أو 10^{13} كيلوغرام). يرتفع الماء بسبب المدّ بمقدار متر واحد ثم يتحرّر خلال الدورة اليومية (في الحقيقة تبلغ المسافة التي يرتفع بها الماء حوالي 0,5 متر، ولكننا نقوم بتقدير مرتبة العِظَم لا غير هنا، لذلك نقرّب هذا إلى 1 متر بغرض التبسيط). يتمّ استرداد الطاقة الكامنة عبر السماح للماء بالتدفّق خارج الحوض المدّ ـ جزري من خلال المولّدات التوربينية، ولنفترض أنّ مردود التحوّل إلى طاقة كهربائية هو 100 في المئة. تساوي الطاقة الكامنة الثقالية mgh المتضمَّنة ـ باعتبار أن $g = 10$

(*) يعادل ذلك مساحة بلد صغير مثل لبنان.

أمتار في الثانية المربّعة ـ قيمةَ 100000 مليار جول (10^{14} جول أو 10^{15} جيغاجول حيث تعني السابقة **جيغا** «المليار»). بتقسيم هذا المقدار على عدد الثواني في الدورة اليومية ـ وهو يعادل 100000 (10^5) تقريباً ـ نجد أن الاستطاعة الوسطية للخرج تساوي تقريباً 1 جيغاواط، أي استطاعة مقدارها مليار واط. تزوّدنا مثلُ هذه الاستطاعة بالطاقة اللازمة لثلاثمئة ألف شخص يستهلك كلّ منهم حوالي ثلاثة آلاف واط. بالرغم من أن طاقة البركة المدّ ـ جزرية مجّانية، ولكنها تستلزم كميةً كبيرة من ماء البحر تملأ منطقة الحوض المدّ ـ جزري الشاسعة. لقد افترضنا كذلك في تقديرنا مردوداً مثالياً 100 في المئة، ولكن لا يمكن الوصول في أقصى تقديراتنا التفاؤلية إلى مثل هذه الفعالية. وكما رأينا يمكن للبركة المدّ - جزرية التي وصفناها أن تزوّدنا بالاستطاعة التي تفي بحاجات بلدة كبيرة، ولكن لا يمكنها إنتاج الاستطاعة التي تفي بحاجات مدينة مثل نيويورك[13].

لا بأس الآن من ذكر تقنية حديثة تُدعى بالمفاعل النووي المفروش

---

(13) يعتقد كثيرٌ من الناس بأن الحلّ لمسألة احتياجاتنا الطاقية يكمن في العودة إلى الأصول، مثل إعادة استخدام المواقد التي تعمل بحرق الحطب. هناك جهود جديّة الآن لتطوير أنواعٍ من الوقود تعتمد على المواد النباتية والحيوانية وبقاياها (كتلة الكائنات الحيّة) في مجالِ علم يُعرفُ باسم «الطاقة الحيوية». يمكن زرع حقول شاسعة من الأرض بأشجار الحور الهيفاءَ الجميلة أو أشجار الأخشاب القطنية [(Cottonwoods) نوع من أشجار الحور الصفصافية، أوراقه بشكل القلب وبذوره قطنية، ينمو في أميركا الشمالية] أو بأشجار الصفصاف، وكلّها مجمّعات جيّدة لطاقة الشمس. عبر وضع بعض الأرقام يمكننا الحصول على تقديرٍ أوّليّ للاستطاعة التي تقدّمها هذه الأشجار من رتبة 1 واط لكلّ متر مربّع مزروع. يمثّل هذا مردوداً لفعاليّة شمسية قدره حوالي واحد في المئة، وهذه قيمة متدنيّة جداً بالنسبة إلى مجتمعٍ استهلاكُ الطاقة لكلّ فردٍ فيه عالٍ. بالإضافة لذلك لا يمكن عدُّ تلوّث المناخ الناجم عن حرقِ الخشب أمراً مُهمَلاً. انظر الموقع الإلكتروني لشبكة معلومات الطاقة الحيوية: Bioenergy Information Network, www.bioenergy.ornl.gov
(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 أيار/ مايو 2004)، حيث يمكن أن تجد كثيراً من عوامل التحويل والقياس فيه.

بالحصى. تَستهلِك هذه المفاعلات اليورانيوم القابل للانشطار فتشبه في ذلك المفاعلاتِ الطبيعيةَ مثل مفاعل منجم أوكلو. يكون اليورانيوم داخل كرات بحجم كريات البلياردو، حيث يُغلَّف مسبقاً ضمن عناصر مغطّاة بالزجاج محكم الإغلاق ممّا يجعلها خاملة كيميائياً (لا تستطيع مثل هذه المنظومات استخدامَ البلوتونيوم ذي الفعالية الكيميائية الكبيرة). ويتمّ الحصول على الطاقة الكهربائية من خلال إحماء غاز الهليوم إلى درجة حرارة عالية ثم إمراره ضمن مولّدات توربينية تنتج الكهرباء. لهذه المنظومات فوائد عدّة مقارنةً مع المفاعلات النووية العادية: أهمها عامل الأمان، فالهليوم ـ بخلاف الماء ـ عنصرٌ خامل كيميائياً، ولا يسبّب أذى للبناء ولا للأنابيب التي يمرّ فيها. عندما يُستنفَد الوقود تُسحَب كرياتُ البلياردو بعيداً، ويجب تخزينها ضمن مستودع للنفايات النووية، لأنّ عدداً قليلاً ـ إن وُجد ـ من الناس يقبل بإيواء مثل هذه الأشياء في باحة بنائه الخلفية. ومع ذلك تُعدّ اليومَ المفاعلاتُ النووية المفروشة بالحصى إحدى الطرق الأقلّ كلفةً لتوليد الطاقة. ونستطيع أن نبني مثل هذه المنشآت مسبقاً ومن دون تكلفةٍ عالية، حيث بإمكان وحدة منفصلة بحجم صومعة مخزن الحبوب أن تُنتِج استطاعةً قدرها مئة ميغاواط، وهذا كافٍ لسدّ حاجات حوالي ثلاثين ألفاً من السكان يستهلكون الطاقة بمعدّل ثلاثة آلاف واط لكلّ شخص. لكن لابدّ من تذكّر أنّ استهلاك اليورانيوم القابل للانشطار من أجل توليد الطاقة على مقاييس كبيرة يعني التأجيل وكسب الوقت لا غير، فعلى المدى البعيد ـ وخلال زمنٍ من رتبة عمر الوقود الأحفوري ـ لا مناص للطاقة المولَّدة بهذا الشكل من أن تُستهلَك بدورها في نهاية المطاف.

احتلّت المزارع الريحية(*) مؤخراً موضعَ الاهتمام في المناقشات

(*) منطقة من الأرض فيها مجموعة كبيرة من المحرّكات الريحية التي تشغّل مولّداتٍ للكهرباء.

عن السياسات الطاقيّة. يمكن للمرء في هذا الميدان إنشاء منظومات بمقاييس كبيرة جداً، كأن تحويَ طاحونات هواء بارتفاع 100 متر (300 قدم) من أعلى شفرة الطاحونة إلى الأرض، يولّد كلّ منها 1 ميغاواط عندما تكون سرعة الرياح 10 متر\ثانية (أي تستطيع مجموعة مؤلّفة من مئة طاحونة أن تولّد المقدارَ نفسه من الطاقة مثل المفاعل النووي المفروش بالحصى المذكور أعلاه). غدت مثل هذه المنظومات منافسةً لمصادر الطاقة ذات الوقود الحجري بفضل استعمال أدواتٍ وأجهزة حديثة تجعلها أكثر قوةً عند هبوب العواصف الهوجاء. يمكن لهذه المنظومات أن تُبنى على مسافةٍ ليست بعيدة كثيراً عن الشواطئ حيث سرعة الرياح العالية ثابتة، ولكن التجربة الأوروبية في هذا المضمار أشارت إلى وجود بعض المشاكل التقانية في هذا المجال. وهناك أيضاً قضايا جمالية وميلٌ متزايد لمقاومة تشويه مناظر الطبيعة ـ قرب الشواطئ أو بعيداً عنها ـ بنشر هذه الطاحونات الضخمة والمفعمة بالضجيج. ومع ذلك أصبحت بعض المدن ـ مثل مدينة كوبنهاغن ـ نموذجاً يُحتذى به في استخدام المزارع الريحية غير الواقعة على الشاطئ وفي قبول الناس لها.

وأخيراً، ماذا عن الاندماج النووي؟ كما تذكرون، هذا الأمر هو أساس الطاقة التي تتولّد في قلب النجوم، وتؤدي إلى تشكّل المادة الاعتيادية. يمكن تشكيل جميع النوى الذرية الأخفّ من الحديد عبر عملية الاندماج (اتّحاد نواتَين لتشكيل نواة أثقل مع إطلاق طاقة). تتمثّل الإجرائية النموذجية في اتّحاد نواتَي دوتيريوم لتشكيل نواة هليوم (تحتوي نواة الدوتيريوم على بروتون ونترون لا غير، وبذلك فهو نظيرٌ للهدروجين). في الحقيقة تنجم **كلّ** مصادر الطاقة بشكل أساسي عن الاندماج، لأنّ جميع ما نحرقه أو نأكله أو نستخرجه من المصادر الطبيعية تمّ خلقه بواسطة الطاقة الآتية من الشمس، ومنبع

هذه الطاقة هو الاندماج النووي. وحتى المواد القابلة للانشطار والمستخدَمة في المفاعلات النووية ليست استثناءً، فهي قد خُلقت في أثناء الانفجارات المستسعرية الفائقة (السوبرنوفا) للنجوم، حيث تُخلق العناصر الثقيلة مغمورةً في بحرٍ من النترونات، وذلك عندما يصل النجم - الذي تشكّل قلبُه الحديدي عبر الاندماج - إلى مرحلة النهاية.

بالرغم من أنّ الوعودَ الأولية بخلقِ منابعَ طاقةٍ - لا متناهيةٍ واقعياً في الكبر - بواسطة الاندماج النّووي لم تتحقّق، فإنّه من السابق لأوانه التخلي عن هذه الإمكانية لحلّ مشكلة احتياجات البشرية للطاقة. يمثّل حلُّ مسألةِ استغلال الاندماج النووي مشروعَ بحثٍ - تحدٍّ على المدى البعيد، سيحتاج ربّما لأربعين أو خمسين سنة من أجل تبيان قابليته للتنفيذ. ولن تكون التكلفة رخيصة، بل ربّما يكلّف المشروع مقداراً مماثلاً للميزانية السنوية لوزارة الدفاع في الولايات المتحدة. لقد أصبح البحث العلمي في مجال الاندماج النووي على مقاييس كبيرة حقلَ تعاونٍ علمي دولي لا سابق له. إن المشروعَ - حجر الزاوية الذي يهدف إلى إثبات الجدوى الاقتصادية علمياً وتقانياً لطاقة الاندماج بحلول عام 2050، هو المفاعل التجريبي النووي الحراري الدولي[14] (International Thermonuclear Experimental Reactor). وهناك مشاريع أخرى وجهود ابتكارية أصغر هي قيد الإنشاء في مختلَف أرجاء العالَم، فلنشبك أصابعنا، ولنبق محافظين على الأمل والتفاؤل هنا.

---

(14) للاستزادة بالمعلومات انظر الموقع الإلكتروني للمفاعل التجريبي النووي الحراري الدولي: International Thermonuclear Experimental Reactor, www.iter.org

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 أيار/ مايو 2004).

تبرز خاصيةٌ عموميةٌ من تحليلنا الموجز السابق: يأتي القسم الأكبر للمشكلة من المعدّل العالي لاستهلاكنا الطاقة. ولذلك قد تكون فكرةً لبيبةً في نهاية الأمر أن نُنقِص من استهلاك الطاقة في مجتمعاتنا من خلال استخدام تقانات حديثة واتّباع سياسات حكومية أكثر ترشيداً في هذا المجال. إذا ما أبقينا على السيارات ذات الإنفاق العالي للبنزين، وعلى التقانات السيئة لحفظ الطاقة، وعلى وسائل النقل العام ذات الفعالية الضعيفة أو الغائبة تماماً، وعلى طيشنا وتهوّرنا في تعاملنا مع الطاقة بغياب سياسات محسوسة حكومية تمنعنا من ذلك، فسوف نبقى حتماً محافظين على معدّل استهلاك الطاقة كما هو الآن. ومع ذلك، إذا لم يغيّر التلوّث وغياب السياسة الطاقية والارتفاع العام في درجات الحرارة من سلوكنا، فإن قانون مصونية الطاقة سيجبرنا يوماً ما على هذا.

لايزال هناك الكثير ممّا يجب التحدّث عنه في مجال الطاقة، ونحن لم نقُم إلاّ بخدش سطح الموضوع. أولاً، ما هو سبب وجود هذا الشيء المُسمّى بـ «الطاقة»؟ وما هي العلاقة العميقة التي تربطه بالتناظرات في القوانين الفيزيائية؟ وما هو سبب وجود تلك العلاقة الوثيقة بين الطاقة والزمن؟ لندعْ أنفسنا نستكشف أكثر في هذا الميدان.



الفصل الثالث

إيـمـي نـوثـــر

سيكون مفيداً جداً لغرض البحوث النفسية أن نعرف ماهية صور العقل الباطن الذهنية ونوع «العوالم الداخلية» التي يستخدمها الرياضياتيون

ألبرت إينشتاين

يُظهِر الكونُ مقداراً كبيراً من التناظر، فلا وجود فيه مثلاً لمركزٍ تدور حوله كلّ الأشياء، بل كلّ نقطة من المكان ـ حالُها في ذلك حالُ أيّ نقطة أخرى ـ تصلح لأن تكون «مركزاً». التعبير الصحيح والعميق لذلك هو أن قوانين الفيزياء نفسها لا تعتمد على موقع المراقب في الفضاء الخالي، بل هي أيضاً لا تعتمد على اتّجاه هذا المراقب في المكان الفارغ. لذا لن يؤثّر التدوير نحو اتّجاه مختلفٍ في المكان عند إجراء تجربةٍ ما على نتيجتها. وقد سبق أن رأينا أنّ هذه القوانين لا تعتمد على زمن تطبيقها، فالزمن مثل المكان لا يمتلك نقطةً خاصّة أو مميّزة. قد يظنّ المرء أنّ هناك استثناءً ممكناً يتمثّل باللحظة الابتدائية للانفجار العظيم، ولكن حتى حادثة الانفجار العظيم ـ كما نعتقد اليوم في علم الكونيات ـ كانت خاضعةً لنفس القوانين الفيزيائية التي تتحكّم بتشكّل قطرات المطر فوق حقل ذُرةٍ

في ولاية كانساس (Kansas). تسيطر قوانين الفيزياء على بنية المكان والزمان حتى عند الشروط الاستثنائية جداً. إن اللحظة الابتدائية للانفجار العظيم هي الطريقة التي تصرّف بها المكان والزمان ـ وفقاً لهذه القوانين ـ عندما كان الكون مؤلّفاً من مادة كثافتها في الواقع لانهائية[1].

من المحتمل وجود تناظرات خفيّة لم نكتشفها بعد. حتى إنّه من المُحتَمل وجود أكوان عديدة يمكن أن تكون مرتبطةً بكوننا من خلال ظواهرَ **الأنفاق الزمكانية**. ويمكن أن يكون الزمان قد وُجد في كونٍ آخر، حيث يفقد مفهومُ «قبل أو بعد بدء كوننا» معناه. من المُحتَمل أيضاً وجود أبعادٍ إضافيةٍ غير مرئية للمكان والزمان، أبعادٍ صغيرةٍ جداً بحيث لم تستطع أقوى مَجاهِرُنا ـ أي مسرّعات الجسيمات ـ اكتشافها بعد. ستمتلك هذه الأبعاد تناظراتٍ مشابهة للتناظرات التي نعرفها، حيث لا وجود لاتّجاه مميّز ومفضّل في المكان. وقد تتضمّن هذه الأبعاد الجديدة أرقاماً رياضياتيةً مجرّدةً بخواصّ غريبةٍ (مثل خاصية عدم التبادل حيث 4×3 ـ = 3×4). يقود هذا إلى مبادئ تناظرية تحكم خواصّ المادة وتُدعى بـ**التناظرات الفائقة**، وهي تتنبّأ بوجود قوى وجسيمات أولية جديدة.

وهكذا لا شيء خاصاً في قوانين الفيزياء يميّز اتجاهات «نحو الأعلى» أو «نحو الأسفل» أو «إلى الجانبَين» أو «إلى الأمام» أو «نحو

---

(1) لايزال السؤال مفتوحاً ـ مع ذلك ـ عمّا إذا كنا نحتاج لمعلوماتٍ إضافية من أجل تحديد الشروط الابتدائية للكون عند اللحظة t = 0. كان رأي ج. ب. هارتل وس. و. هوكينغ في: J. B. Hartle and S. W. Hawking, «The Wave Function of the Universe,» *Physical Review*, D28 (1983), p. 2960.

أنّ القيام باستيفاءٍ (تقدير استقرائي) أملس لقوانين الفيزياء لغاية هذه النقطة قد يكون ذا معنى بشكلٍ مُرضٍ وكافٍ.

الخلف» من بعضها البعض. إنّ الكون ديمقراطيٌ تماماً، فجميع الاتجاهات والأماكن والأزمنة وُلدت متساوية. وهناك تناظرات أكثر بكثير من ذلك تتواجد وتتجلّى في عالَم الجسيمات الأولية والقوى أي عالَم المكوِّنات الأساسية للطبيعة.

لقد تمَّ البرهان من خلال الملاحظات الفلكية والجيولوجية على ثبات الوسائط والبارامترات الأساسية في الطبيعة ـ «الثوابت الأساسية» في الفيزياء ـ على مسافات شاسعة وأزمنة طويلة وذلك حتى دقّة 1/1,000,000,000، كما رأينا في ظاهرة المفاعل النووي الطبيعي من غابر الأزمان في أوكلو وغيرها. ومن المهم إدراك أنّ القوانين الأساسية في الفيزياء تبقى نفسها أيضاً عندما نتفحصّها على مسافات وأزمنة صغيرة جداً، بما فيها ذات رتبة الأزمنة فائقة الصغر التي تستغرقها العمليات المتضمِّنة للجسيمات الأولية.

يعتبر الفيزيائيون أيَّ ثباتٍ أو عدمَ تغيّر نصادفه، هو نوعٌ من التناظر تتمتّع به الطبيعة. وهكذا يمكن أن يكون هذا التناظرُ هو بقاءُ القوانين مطابقةً لنفسها عند الانتقال من موضع إلى آخر في الكون، أي بقاؤها نفسُها عند تغيير المكان أو الزمان أو الاتجاه. ويمكن للتناظر كذلك أن يكون ثباتَ خصائص منظومة ما عندما نفعل شيئاً محاولين به تغييرها. إنّ تطابقَ القوانين يوم غد مع حالتها البارحة، هو تناظرٌ وثباتٌ خلال تقدّمنا إلى الأمام في الزمن ضمن الكون. أمّا تطابقُها في مكانٍ ما مع ما هي عليه هنا، فهو تناظرٌ وثباتٌ عند تحرّكنا في أرجاء المكان ضمن الكون.

الرياضيات إزاء الفيزياء

يُنظَر إلى إيمي نوثر على أنّها الأعظم من بين جميع النساء اللواتي عملن في مجال الرياضيات، ولو غضضنا النظر عن الجنس

فهي بالتأكيد واحدة مِن أعظم مَن عمل في هذا المجال عبر التاريخ، فقد طوّرت فروعاً جديدةً تماماً في **الجبر المجرّد** دفعت حدودَ عالَم المنظومات الرياضياتية قدماً إلى الأمام وصقلت طبيعة ومعاني ماهية الرياضيات. وقد قامت بابتكار بنية جبرية شهيرة ومميَّزة هي الحلقة النوثرية. مع ذلك فإنّ إسهامها الأكثر عمقاً كان في مجال الفيزياء النظرية، حيث أثّرت مساهمتها هذه في آخر الأمر على فهمنا لكيفية عمل الكون عند مستوياته الأعمق. لكن حتى في أيامنا الحالية قد يكون صحيحاً القول إنَّه بالرغم من سماع غالبية الرياضياتيين بنظرية نوثر في الفيزياء، إلاّ أنهم لا يعون تماماً مقتضياتها ومعانيها في الفيزياء النظرية. بالمقابل يبدو من المؤكَّد عدم امتلاك غالبية الفيزيائيين للتقدير الجيّد أو المعرفة الملمّة بمفهوم الحلقات النوثرية في الرياضيات. إن العالَمين اللذين يقطنهما الفيزيائيون النظريون والرياضياتيون مستقلّان ومنفصلان عادةً عن بعضهما البعض. ولا تطلق الأبواق أصواتها ولا تقرع الطبول إلاّ في تلك اللحظات النادرة التي يقترب عندها هذان العالَمان من بعضهما فيبدأ العلم بالحركة إلى الأمام!

إذا سألنا طلاب صفٍّ مدرسةٍ في المرحلة الثانوية أن يذكروا لنا اسم أشهر لاعبي السلّة المحترفين، فسنحصل سريعاً على قائمة طويلة من اللاعبين، مع أنّه في كثيرٍ من الأحيان سنسمع أولاً اسمَ مايكل جوردان (Michael Jordan) (خاصةً في أراضي شيكاغو). لكن إذا سألنا الطلاب أنفسهم عن اسم أعظم الرياضياتيين الذين عاشوا على مرّ التاريخ، فإنّ طولَ قائمةِ الأسماء سيكبر بمعدّل انغماس كرة مضرب في جرّة مملوءة بالدبس. ومع ذلك فإننا سنسمع عادةً اسمَ إينشتاين يأتي في المقدّمة. إننا لا نتردّد في إعطاء مصداقية لمثل هذه الإجابة، ولكن هل نحن نعرف جيداً أين يقع الأثر العميق للثورة الإينشتاينية؟ في الحقيقة إنه لا يقع في مجال الرياضيات بل في مجال الفيزياء النظرية. تلجأ الفيزياءُ النظرية للاستعارة والاقتراض من

الرياضيات (ويمكنها في حال عدم وجود ما تريد استعارته أن تخترعَ رياضيات جديدة) بغرض بناء خريطةِ طريقٍ رياضياتية للأشياء التي من الممكنِ حدوثُها في العالَم الحقيقي أي في الطبيعة. تسعى الفيزياء النظرية إلى تفسير جميع الظواهر العديدة والمتنوّعة التي نلاحظها في الكون، وقد يكون ما تكافح من أجله في النهاية هو إيجاد نظامِ توصيفٍ واحد ـ منطقي واقتصادي وأنيق ـ للطبيعة. مع ذلك يرضى الفيزيائيون عادةً بتحقيق انتصارات أقلّ شموليةً، عندما يتمكّنون من إنجاز وصفٍ ناجح لعدة منظومات فيزيائية لها السلوك المفهوم نفسه. ويتمّ بناء هذا الوصف دائماً من خلال لغة الرياضيات المجرّدة.

لقد كشفت الطبيعة في الواقع عن أسس رياضياتية عميقة وعن علاقات متبادَلة عديدة بين الظواهر المختلفة لها. على سبيل المثال، تعلّمنا منذ منتصف القرن التاسع عشر أنّ المغناطيسية مرتبطة بالقوة الكهربائية (عبر الحركة)، وأنهما في الحقيقة وجهان لعملةٍ واحدة عندما يتمّ توحيدهما من خلال تناظر قوانين الطبيعة تحت شروطِ حركةٍ مختلفة. ندعو هذه الظاهرة بـ**الكهرمغناطيسية**، ويمكن تلخيص مجمل الظواهر الكهرمغناطيسية بشكل أنيق ضمن نظرية واحدة جميلة وبسيطة تحتوي على قدرٍ وافر من التناظر. يُشار عادةً إلى هذا الوصف الموحَّد للكهرمغناطيسية باسم «معادلات ماكسويل» نسبةً إلى الفيزيائي البريطاني جيمس كلارك ماكسويل (James Clark Maxwell) (1831 ـ 1879). ولكنْ هناك عموماً عدة طرق رياضياتية بديلة ومكافئة من أجل صياغة وصفٍ للظواهر المعنية، تماماً مثلما توجد طرقٌ عديدة لرسم منظر جبلٍ مهيب. تكمن النقطة الرئيسة هنا ـ بحدود ما يمكننا قوله ـ في أنّ جميع ظواهر الطبيعة التي يمكن ملاحظتها، إنما هي مضبوطة بالبناء المنطقي العميق للرياضيات، فيبدو إذاً أنّ الطبيعة تتكلّم لغة الرياضيات.

على الرغم من أنّ الطبيعة تقترحُ وجود طريقٍ يفضي بنا إلى وصفٍ رياضياتي واحد لكلّ شيء، ولكن نهاية هذا الطريق فاتتنا لغاية الآن، إذ لم نصل بعد إلى الصورة المركّبة الرياضياتية الكبيرة والكاملة. لقد تحقق تطوّرٌ هائل في مجال **نظرية الأوتار الفائقة** التي تصف جميع القوى والجسيمات ضمن نظرية رياضياتية واحدة تشمل الثقالةَ كحجر زاويةٍ لها. ومع ذلك لا يزال هناك كثيرٌ من نهايات الخيوط الطليقة. إنّ نموذجَ الجسيمات الأولية المتوقع به نظرياً والمعروفَ باسم التناظر الفائق (الناتج عن نظرية الأوتار الفائقة)، قد يبدأ بالظهور في التجارب القادمة. بالمقابل قد نستلم مذكّرة قاسية من الكائن (أو الكائنات) السامي تعلمنا بأنّ العقل البشري وحده غير قادرٍ على توقع تنوّعات الطبيعة كافة في ظلّ غيابِ الدليل التجريبي. في جميع الأحوال، لا يزال هناك كثيرٌ من العملِ الذي يتوجّب إتمامه في الفيزياء النظرية والتجريبية على السواء، ولا تزال لدينا جوائز نوبل عديدة تنتظر الحصولَ عليها من قبل الفيزيائيين الشباب الحاليين أو فيزيائيي الأجيال القادمة.

إنّ موضوعَ الرياضيات له هوية وكيان خاصّان به، فالرياضياتيون على الناحية الأخرى ـ بخلاف الفيزيائيين ـ يحاولون إنشاء خريطة طريق لجميع **النظم المنطقية** والمنسجمة داخلياً التي يمكن وجودها، بقطع النظر عمّا إذا كانت لها علاقة بالطبيعة أم لا. ومع هذا فإنه لا يجب إغفال أنّ الطبيعة هي التي تزوّدنا بالأساس التجريدي الذي يؤدي لولادة الرياضيات، فمثلاً الأشكال التي نراها في الرياضيات كالمثلثات والدوائر ومتعددي الأضلاع والمجسمات متعددة الأوجه، تمّ تجريدها من وقائع طبيعية على يدّ الإغريق القدماء عند إنشائهم لأول منظومة رياضياتية كاملة: الهندسة الإقليدية. وهكذا فإنّ الرياضيات تستلهم وحيها من الطبيعة، ولكنها لا تحتاج إلى توفّر

ملاحظات واقعية تجريبية من أجل مواصلة السير والتقدم. ومن هنا يُقال إنّ عالَمي الرياضيات والفيزياء النظرية متمايزان، وإنّ «تصريحَي أمرَي مهمّتيهما» مختلفان. بينما تحدّد الفيزياء النظرية خصائص الطبيعة التي نعيش فيها، فإنّ الرياضيات تحدّد جميع «أشكال الطبيعة» التي يسمح المنطق بوجودها. وبالتالي يتعايش عالَما الرياضيات والفيزياء النظرية معاً، فيزدهران أحياناً ونكون عندها في عصور ذهبية، ويتوقّفان عن ذلك في أحيانٍ أخرى. تشبه حالتهما حالةَ شخصين متزوّجَين يعيشان معاً في شقةٍ من بناء قديم في حي مانهاتن، فأحياناً نسمع أصوات شجارهما، وأحياناً أخرى نسمع صوت قيامهما بالعمل الجنسي من خلال الجدران الجبصية القديمة. لكن في غالبية الأحيان يخيّم عليهما الهدوء والعيش السلمي المشترك.

مما سبق نستطيع أن نقول إنّ هناك عدم تماثُل في ما يخصّ الهدف والوجهة بين هذين العالَمين الذهنيَّين: الرياضيات والفيزياء النظرية. ولكنْ المساهمة العظمى لإيمي نوثر أي نظرية نوثر كانت رابطةً قويةً جمعت بين العالَمين وكأنها نفقٌ يربط بين كونَين مختلفَين، إذ أوجدت مدخلاً أو بوابة تصل بين التناظر وبين السلوك الديناميكي للنظم الفيزيائية.

حياة إيمي نوثر والعصر الذي عاشت فيه

عملت إيمي نوثر في زمنٍ حفل باكتشافاتٍ جديدة واختراقاتٍ عميقة في مجال بنية وشكل الرياضيات نفسها. لقد كان ذلك في بداية القرن العشرين، حيث تمَّ إجراء مراجعةٍ جذرية وإعادةِ تركيبٍ شاملة في حقلَي الفيزياء النظرية والرياضيات، ففي كلا الحقلين كانت تُرسَم خريطةٌ جديدة لمناطقَ تمّ اكتشافها حديثاً، وكانت تتمّ إعادةُ

النظر في الخرائط التقليدية التي مرّت عليها قرونٌ كاملة. وفي الواقع كان الأسلوب وطريقة المحاكمة في حقلي العلم هذين مرتبطين ارتباطاً وثيقاً، وإن بقيا متمايزين.

كان ماكس نوثر (Max Nother) والدُ إيمي أحدَ أهمّ الرياضياتيين في القرن التاسع عشر. وكانت ألمانيا حينها المركزَ الفكري للرياضيات ـ بالإضافة لجميع العلوم الفيزيائية وعلوم الهندسة والطبّ والبيولوجيا ـ في العالَم، كما كانت مركزاً للتقدّم التقاني السريع. لقدّ مثّل ذلك الزمنُ بالنسبة إلى المجتمع الألماني عصرَ تغيّراتٍ عميقة من الناحية السياسية والإقليمية والثقافية والاقتصادية وكذلك الاجتماعية، فقد كان عصرَ الامبراطورية الألمانية ومستشارها القوي أوتو فون بسمارك ـ شونهاوسن (Otto von Bismarck-Schönhausen) (1815 ـ 1898) الذي قاد مسيرة توحيد مئات من الإمارات والدويلات الصغيرة لبناء أمةٍ واحدة جديدةٍ وقوية.

سادت مظاهر الغنى والحرية والتسامح في ألمانيا في ذلك الوقت، وتزامن ذلك مع تحسيناتٍ مستمرة في مستوى دخل وحياة الناس العاديين بفضل الثورة الصناعية أساساً. خيّم جوٌّ من التفاؤل عزّز الإيمانَ بأنّ البشر قد يحققون أخيراً «المدينة المثالية ـ الإيتوبيا». كان سمو الأمير فريدريك الثاني (Friederich II) ـ وهو ابن القيصر الجالس على العرش فيلهلم الأول (Wilhelm I) ووالد القيصر التالي فيلهلم الثاني (Wilhelm II) ـ يخطّط لإدخال تعديلاتٍ اجتماعية كثيرة من أجل تحسين حياة الطبقات الفقيرة ـ وخاصة عمال المناجم ـ في هذه الأمة الناهضة خلال فترة حكمه الآتية. وكان من المُحتمَل حدوث هذا الأمر الذي كان سيجعل القرن العشرين اللاحق يأخذ منحى آخر، لو لم يسقط الأميرُ فريدريك ضحيةَ موتٍ ـ أتى في غير أوانه ـ ناجمٍ عن سرطانٍ في الحنجرة، وذلك قبل أن يصير الأمير

قيصراً. لقد أُكتشف السرطان في مرحلة مبكّرة، وكان الورمُ صغيراً وقابلاً للمعالجة، ولكنّ الآفة تفاقمت عندما اختار فريدريك اتّباعَ أمر «الاستراحة في السرير» الذي أشار به أشهر طبيب بريطاني لأمراض الحنجرة حينها (تمّ استدعاؤه بناءً على توصية من الملكة فيكتوريا (Victoria) نفسها) بدلاً من سماع الرجاءات الملحّة لجرّاحيه الألمان البارعين باستئصال الورم من دون تأخير. بعد ذلك انتقلت وراثة العرش إلى ابنه وليام الثاني عام 1888، وقاد هذا إلى الشروع في السير نحو اتّجاهٍ آخر، أدّى في النهاية إلى محرقة الهولوكوست[2] (Holocaust).

كانت عائلة نوثر يهودية، أي إنّها انتمت إلى أقلية عرقية في ألمانيا عانت الكثير من الاضطهاد في مختلف أرجاء شمال أوروبا. وُلد ماكس نوثر في مانهايم (Mannheim) عام 1844 لعائلةٍ كانت لديها أعمالُ تجارةٍ بالجملة للأدوات تديرها بنجاح. أصيب بشلل الأطفال في الرابعة عشرة من عمره، ونتيجةً لذلك بقي معاقاً بقية حياته. نجح بإتمام دراسته في الجمنازيوم (Gymnasium)، وهي مكافئة تقريباً للمدرسة الثانوية التقليدية في الولايات المتحدة، ولكنّ الدراسةَ تتم فيها ضمن المنزل. وكغيره من عمالقة الرياضيات، بدأ يدرس المواضيع المتقدمة في الرياضيات بشكل مستقل وعلّم نفسه بنفسه. زوّده ذلك بالوقت اللازم للتركيز على النقاط الدقيقة وللتقدّم بسرعةٍ تناسبه كشخصٍ منفرد. التحق ماكس نوثر لاحقاً بجامعة هايدلبرغ (Heidelberg) سنة 1865، وحاز على ما يكافئ درجة الدكتوراه خلال فترة قصيرة لا تتعدّى الثلاث سنوات.

---

(2) Robert K. Massie, *Dreadnought: Britain, Germany, and the Coming of the Great War* (New York: Random House, 1991), pp. 38-43.

كانت الجامعة في ألمانيا في المرحلة من نهاية القرن التاسع عشر إلى بداية القرن العشرين مكاناً حوى الكثير من الأمور المتناقضة والمتميّزة، وكانت فيه مجموعةٌ ذات شأن وتأثير عميقَين خاصةً في مجال العلوم والرياضيات حيث كانت تُعتَبر الأفضل في العالَم. لقد مثّلت الجامعة الألمانيةُ في ذلك الوقت المكانَ الذي وُجدت فيه أعلى المستويات الأكاديمية، وهو الذي شهد مولد ميكانيك الكمّ ونظرية النسبية العامة لإينشتاين بالإضافة إلى القسم الأكبر من الرياضيات الحديثة من أمثال الجبر المجرّد والطوبولوجيا والهندسة التفاضلية وغيرها. وقد وجدت الأقليات العرقية هنا مجتمعاً متسامحاً منفتحاً ومتقبّلاً، وبذلك توفَّر لها المكان كي تُبدع وتجد الراحة بعيداً عن مجتمع العصبية القومية المحافظة في الخارج. إذاً تمتَّعت الجامعة ببيئة تواصلٍ هادئة وحياةٍ أكاديمية يشترك الجميع وفقها في حبّهم العميق والثابت لعملهم التجريدي. وهذا بالرغم من أنّ الجامعات الألمانية كانت كذلك مكاناً للشباب «القابل للتعلّم» من جماعات الاتجاه السائد، إذ كان أهلهم يرسلونهم من منازلهم لكي يغدوا رجالاً (عادةً مع تأدية قسمٍ من الخدمة العسكرية).

كان ماكس نوثر طالباً هادئاً يعيش حياة المتنسّك الأكاديمي منفصلاً عن التيارات الغالبة في المجتمع الألماني. أصبح عضواً في هيئة التدريس في جامعة هايدلبرغ لسنين عديدة، ثم التحق بجامعة إيرلانغن (Earlangen) حيث عمل أستاذاً ذا مقعد من سنة 1888 ولغاية 1919. وهو يُعتبر واحداً من مؤسسي **الهندسة الجبرية** في القرن التاسع عشر سائراً على خطى عملاقٍ رياضياتي آخر، إنه برنارد ريمان (Bernard Riemann) أحد آباء الهندسة اللاإقليدية التي صارت في ما بعد حجر الأساس في نظرية إينشتاين في النسبية العامة.

تزوَّج ماكس نوثر في عام 1880 الآنسة إيدا أماليا كاوفمان (Ida

(Amalia Kaufmann، ورزقا بطفلة في 23 آذار/مارس 1882 أسمياها أماليا (على اسم أمّها) أو إيمي تحبباً. ذهبت إيمي ـ التي كان لها ثلاثة إخوة أصغر منها ـ إلى المدرسة الثانوية في إيرلانغن خلال تسعينيات القرن التاسع عشر، ودرست اللغات والرياضيات والعزف على البيانو. وقد كان طموحها الأول هو أن تصبح معلّمةً تدرّس اللغات.

غيّرت إيمي فجأةً من اتجاهاتها، فبدلاً من السعي وراء حياةٍ مهنية في التعليم، قرّرت أن تركّز في دراستها المتقدّمة على المجال الذي عمل به والدها، أي على مجال الرياضيات. كان هذا أمراً لم يُسمَع به من قبل بالنسبة إلى نساء عصرها، حيث لم يكُن يُسمح لهنّ بالدراسة في الجامعات الألمانية إلاّ بشكل غير رسمي، ويُطلب منهن الحصول على موافقة كلّ أستاذٍ يحضرن دروسَه. ولكنْ بالرغم من هذه العوائق أنهت إيمي دراستها، واجتازت عام 1903 الامتحان الرسمي للقبول في الدرجة الأعلى، وهو يماثل الحصول على درجة البكالوريوس (الدرجة الجامعية الأولى).

ذهبت إيمي نوثر بعدها إلى جامعة غوتنغن (Göttingen) من أجل مرحلة الدراسات العليا، وهناك واظبت على حضور محاضرات الرياضياتيين العمالقة في ذلك العصر من أمثال دايفد هيلبرت (David Hilbert) وفليكس كلاين (Felix Klein) وهرمان منكوفسكي (Hermann Minkowski)، وأنهت دراسة الدكتوراه عام 1907، ولكنها عادت حينها إلى إرلانغن لتساعد والدها الشيخ العليل. في هذا الوقت أيضاً، بدأت حياتَها المهنية البحثية في مجال الرياضيات، وأخذت سمعتُها كرياضياتية لامعة بالانتشار سريعاً، و نالت خلال هذه الفترة كثيراً من أوسمة الشرف.

كان دايفد هيلبرت القيادي الأهمّ في الرياضيات في بداية القرن

العشرين. في الواقع تبيَّن مع حلول هذا القرن وجودُ بعض التناقضات الداخلية في **نظرية المجموعات**: وهي منظومةٌ مجرّدة لمناقشة البنية المنطقية لكلّ أنواع الرياضيات. ولغاية ذلك الوقت كان يُنظر إلى نظرية المجموعات على أنها القاعدة الطبيعية والأساسية للرياضيات. لذا اقترح هيلبرت مشروعَ برنامجٍ لتسوية هذه المشاكل البنيوية المنطقية ولـ «تنظيف» الرياضيات.

تمّ تقديم برنامج هيلبرت عن الرياضيات في خطابٍ شهير بعنوان «مسائل الرياضيات» ألقاه عام 1904 في المؤتمر الدولي الثاني للرياضيات في باريس. تحدّى هيلبرت في خطابه مجتمع الرياضياتيين في العالَم بأن يركّزوا جهودهم لحلّ ثلاث وعشرين مسألة نموذجية اعتبرها من أهمّ الأسئلة وأكثرها إيضاحاً، لأنّها قضايا ستضيء البنيةَ الداخلية للرياضيات نفسها. تضمّنت هذه المسائل من بين ما تضمّنته مسألةَ **فرضية ريمان** ومسألة **فرضية المتّصل** ومسألة **مسلّمة غولدباخ** (Goldbach). بقي كثيرٌ من هذه المسائل المعروفة بلا حلّ حتى يومنا هذا، ولا تزال مسألةُ إيجاد برهان عليها الهدفَ الأشهر الذي يسعى إليه العاملون في الرياضيات في جميع أصقاع الأرض. وفي الحقيقة تمّ حلّ قسمٍ من هذه المسائل الشهيرة خلال الجزء الأخير من القرن العشرين، وربّما يكون قسمٌ آخر في طور الحلّ الآن. شعر هيلبرت في النهاية بإمكانية بناء صرحٍ رياضياتي متّسق ومنسجم داخلياً، وبذلك سنتمكّن أخيراً من اعتبار الرياضيات نظاماً منطقياً متناسقاً وكاملاً. واعتقد هيلبرت أنْ لا مفاجآتٍ بقيت في حقل الرياضيات، إذ شبّه حالتها بحالة حصان فوق رقعة شطرنجٍ لا متناهية في الكبر، حيث يمكنه الانتقال من أي مربّع إلى آخر بافتراضِ إمكانيةِ القيامِ بعددٍ غير محدود من الخطوات المسموحة.

دعا هيلبرت وكلاين عام 1915 إيمي نوثر للعودة إلى جامعة

غوتنغن من أجل متابعة أبحاثها والقيام بالتدريس. عملت نوثر في غوتنغن، ولكنّ دورَها في العمل لم يكن واضحاً، بل كان مجرَّد عمل تابع وغير مدفوع الأجر. وفي هذه الأثناء كان هيلبرت يخوض المعارك الشاقة مع سلطات الجامعة لكي تسمح لامرأة بأن تصير عضوة في هيئة التدريس. احتّج أغلب الأعضاء ضدّ هذا الأمر: «كيف يمكن السماح لامرأة أن تغدو مدرِّسة خاصّة ـ **بريفات دوزنت** (Privatdozent) (وهذه مرتبة أكاديمية مكافئة تقريباً لمرتبة الأستاذ المساعد)؟ إذا أصبحَت بريفات دوزنت، فإن بإمكانها أن تصبح أستاذة وعضواً في المجلس الأعلى للجامعة. . . بماذا سيفكّر جنودنا عندما يعودون إلى الجامعة ليجدوا أنّ عليهم الدراسة عند أقدام امرأة؟»

كان هيلبرت يجيب على هذه الحجّة بالقول «أيها السادة المحترمون، أنا لا أرى مبرّراً لأن يكون جنسُ الشخص المرشَّح سبباً لمعارضة قبوله كبريفات دوزنت، إنّ مجلسَ الجامعة، في نهاية الأمر، ليس حمّاماً عمومياً للرجال»[3].

من الجدير بالملاحظة أن مثل هذه الشوفينية والغلو في معارضة الأكاديميات النساء لم يقتصر في تاريخ الرياضيات والعلوم على ألمانيا وحدها. وكان في صلب موضوع المناقشة حينئذٍ السؤالُ عمّا إذا كان من الممكن لنوثر الحصول على شهادة التأهيل ـ **هابيليتاشن** (Habilitation)، وهي مؤَهلٌ يجب على الباحثين حيازته قبل أن يُقبلوا للتدريس في الجامعة، ولكنّ القوانين وقتها لم تكن تسمح بمنحه لأيّ امرأة. وأخيراً أعطيت إيمي نوثر ـ بفضل جهود هيلبرت

---

(3) Simon Singh, *Fermat's Enigma: The Epic Quest to Solve the World's Greatest Mathematical Problem*, Foreword by John Lynch (New York: Walker, 1997), p. 100.

المضنية والموهبة الاستثنائية لنوثر نفسها ـ السماحَ بحيازة الهابيليتاشن سنة 1919. بينما كان عليها طوال تلك الفترة تقديمُ محاضراتها العلنية تحت اسم الأستاذ هيلبرت عند الإعلان عنها:

محاضرة في الفيزياء الرياضياتية
الأستاذ هيلبرت بمساعدة
د. إ. نوثر
يوم الاثنين من الساعة الرابعة إلى الساعة السادسة، الحضور مجاني[(4)].

كان أولُ عملٍ قامت به إيمي نوثر سنة 1915 مباشرةً بعد وصولها لغوتنغن، هو العملُ الذي يمثّل مساهمتها العميقة في الفيزياء النظرية أي إثبات نظرية نوثر. تقول هذه النظرية باختصار إنه من أجل أيّ تناظر مستمرّ في قوانين الفيزياء هناك قانون مصونية موافق لهذا التناظر. كما رأينا في مثالٍ سابق تجلّت فيه نتيجة نظرية نوثر: يؤدي تناظرُ ـ أي صمود ـ القوانين الفيزيائية وعدمُ تغيّرها مع الزمن إلى **قانون مصونية الطاقة.** والاتجاه المعاكس في النظرية صحيحٌ كذلك، فانحفاظ الطاقة يقتضي عدم تغيّر الفيزياء مع الزمن. ومع ذلك تذهب نظرية نوثر إلى أبعد بكثير من مجرّد مصونية الطاقة، فهي تُبرز وبطريقة عميقة وأساسية فكرةَ أن التناظر هو الموضوع الأساسي

---

(4) إعلان موجود في أرشيف المحاضرات لجامعة غوتنغن 1916 ـ 1917، ومذكورٌ في المقال الرائع عن سيرة إيمي نوثر الذي كتبه ج. ج. أوكونور (J. J. O'Connor) وإ. ف. روبرتسون (E. F. Robertson) في القسم الخاصّ بـ إيمي أمالي موثر، انظر: www-gap.dcs.st-and.ac.uk

(كلا الموقعَين وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 أيار/ مايو 2004). توجد في الموقع الثاني مجموعة صورٍ كثيرة، ولكنّ إيجاد صورٍ لنوثر قابلةٍ للنشر كان مهمةً صعبة لأنّ المعلومات عن ملكية الصورة كانت في الغالب غير متوفّرة.

والأكثر أهمية في الطبيعة. سنتوسّع لاحقاً في هذا الكتاب في شرح المعاني والمقتضيات الوفيرة لهذه النتيجة الأنيقة والبسيطة في أن جميع قوانين المصونية تعكس في أعماقها وجودَ تناظراتٍ أساسية في قوانين الطبيعة. لقد نظّمَت ووحّدَت نظرية نوثر أفكاراً عديدة كانت معروفة منذ وقتٍ طويل، عندما وضعتها بإحكام فوق دعائم التناظر[5].

عُدّ التناظر في ذلك الوقت طريقةً ثورية وجديدةً كلّ الجدّة للتفكير في قوانين الطبيعة. تدمج نظرية نوثر وبشكل صميمي الديناميكَ بالتناظر، وهي تفسّر في النهاية وجودَ القوى وديناميك الطبيعة كنتيجة لوجود تناظرات تحتية عميقة. تُعتبر نظرية نوثر من دون أيّ شك واحدةً من أهم النظريات الرياضياتية - التي تمّ إثباتها - في قيادتها لتطوّر الفيزياء الحديثة، وهي في ذلك ربما تقف على قدم المساواة مع نظرية فيثاغورس. إنها في حقيقة الأمر لا تنتمي إلى منطقة الرياضيات البحتة، بل هي بالأحرى تصريحٌ رياضياتي عميق عن مجمل العالَم الفيزيائي.

اعترف الجميع مباشرةً بالأهمية الكبيرة لعمل نوثر، وأثنى إينشتاين على مساهمتها واصفاً إياها بالـ «اختراق في التفكير

---

(5) Nina Byers, «E. Noether's Discovery of the Deep Connection between Symmetries and Conservation Laws,» Paper Presented at the Symposium: On the Heritage of Emmy Noether in Algebra, Geometry, and Physics; Published in: Mina Teicher, ed., *The Heritage of Emmy Noether* (Ramat-Gan, Israel: Gelbart Research Institute for Mathematical Sciences and the Emmy Noether Research Institute, 1999).

انظر أيضاً: Nina Byers, ed.,» Emmy Noether: 1882-1935,» Contributions of 20th-Century Women to Physics,» www.physia.uda.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 أيار/ مايو 2004).

الرياضياتي» في رسالةٍ كتبها إلى هيلبرت من أجل دفع الحياة المهنية للرياضياتية الشابة الموهوبة إلى الأمام. ومن المُحتَمل أن تكون النظرية قد أدت دوراً في دفع دايفد هيلبرت نفسه ليقومَ بغزوته على حقل الفيزياء النظرية، عندما اقترح صياغةً للثقالة مكافئةً في الواقع لنظرية إينشتاين في النسبية العامة ومتزامنةً معها بشكلٍ يثير الجدل.

استمرت نوثر في اللمعان في حياتها المهنية في الرياضيات، ممّا أكسبها كثيراً من الأوسمة والجوائز العالَمية، حتى صُنّفت من بين أحسن الرياضياتيين على مرّ العصور. بعد عام 1919، ركّزت نوثر في غوتنغن على موضوعٍ واحد في مجال الرياضيات البحتة هو الجبر المجرّد. لقد حققت إنجازاتٍ كبيرة هنا ساعدت في جعل **نظرية الحلقات** فرعاً مهماً من الرياضيات. تعنى نظرية الحلقات بكيفية تجريد الأرقام بالإضافة إلى التوابع والعمليات التي يمكن تطبيقها عليها. إنها تحاول استقطارَ بنية الجبر وفصادتها لوضع مجموعاتٍ من القواعد تتحدّد الرياضياتُ من خلالها بغضّ النظر عن تفاصيل هذه القواعد. كان لعمل نوثر عام 1921 المعنوَن بـ «نظرية المُثُل في الحلقة» (Idealtheorie in Ringbereichen) الأثر الهام في تطوير الجبر الحديث[6]. لقد قدّمت في هذه الورقة تحليلاً يسلّط الضوء على البنية الأساسية لبعض الكائنات الجبرية، ويعمّم نتيجةَ نظريةٍ مهمة برهنها سابقاً البطل العالَمي في الشطرنج إيمانويل لاسكر (Emmanuel Lasker) الذي كان بدوره أيضاً تلميذاً لهيلبرت.

واصلت نوثر خلال العشرينيات عملها الأساسي في مجال الجبر المجرّد. في عام 1924 أتى الرياضياتي المعروف ب. ل. فان در

(6) Emmy Noether, *Gesammelte Abhandlungen = Collected Papers*, Herausgegeben von N. Jacobson (New York: Springer-Verlag, 1983).

فاردن (B. L. van der Waerden) إلى غوتنغن، وأمضى سنةً كاملة يعمل مع نوثر. عندما عاد إلى أمستردام كتب كتاباً مؤثّراً بعنوان **الجبر الحديث**، ظهر في جزأين خُصّص الثاني منهما تقريباً لعمل إيمي نوثر لا غير. استمرّت نوثر اعتباراً من عام 1927 فصاعداً في تعاونها مع رياضياتيين لامعين في أوروبا، وأصبحت رئيسة تحرير مجلة **حوليّات الرياضيات** (*Mathematische Annalen*) ـ المجلة الرياضياتية الأعلى مقاماً في ذلك الوقت. وفي آخر الأمر رأى القسمُ الأكبر من أعمال نوثر النورَ في الورقات المشهورة التي كتبها زملاؤها وطلابها، وليس في أعمالٍ تحت اسمها الخاص. لقد كانت مربّيةً مخلصةً وصبورةً، وكانت معروفةً بكرمها نحو طلابها في كثيرٍ من أفكارها الحديثة والابتكارية. ويُقال إنّ كثيراً من طلابها نال في النهاية المديحَ والتقديرَ عن أفكارٍ لها تحادثت بها معهم بحرية ومن دون «امتيازات» أكاديمية، وذلك من أجل دفعهم للأعلى في سلّم حياتهم المهنية.

رغم ما ذكرناه، انتشرت شهرة نوثر وحملتها إلى أنحاء بعيدة في أرجاء العالم الأكاديمي لذلك العصر، فقد حلّت بين عامَي 1928 و1929 أستاذة زائرة في جامعة موسكو، ونالَت شرف إلقاء كلمة في المؤتمر الدولي للرياضيات الذي انعقد في مدينة بولونيا (Bologna) عام 1928. وفي عام 1930 درّست في جامعة فرانكفورت، وطُلب منها مرّة أخرى إلقاء محاضرة في المؤتمر الدولي للرياضيات المشهور والمنعقد في مدينة زوريخ عام 1932، حيث مُنحت فيه جائزة ألفرد أكيرمان ـ توبنر (Alfred Ackermann-Teubner) التذكارية لتطوير المعارف الرياضياتية، وهي جائزة مرموقة جداً.

في هذا الوقت تحطّمت نظرةُ دايفد هيلبرت الواثقة والمطمئنة عن كمال وانتظام صرح الرياضيات، إذ تحوّلت إلى أشلاء عبر نظرية

جذرية تمّ البرهان عليها عام 1931 من قبل الشابّ كورت غودل (Kurt Gödel). آمن هيلبرت بكون مجملِ الرياضيات نظاماً منطقياً متّسقاً ومنسجماً مع ذاته لأبعد الحدود. يعني ذلك أنْ لا نظرية رياضياتية يمكن أن تقود إلى تعارضٍ وعدمِ انسجامٍ مع أيّ نظرية أخرى. إذا قمتَ بإثبات أنني لا أستطيعِ السيَر من جزيرة أواهو (Oahu) في هاواي إلى لوس أنجلوس في كاليفورنيا من دون الإصابة بالبلل، فإنني ـ وفق وجهة النظر هذه ـ لن أتمكّن من أن أُثبتَ وجودَ جسر أرضي خلفي (أو نفقٍ مخفي) تربط الجزيرة بالشاطئ الغربي لتجعلني قادراً على السير فوقها مع بقائي جافاً.

بيّن كورت غودل ـ من خلال نظريته الشهيرة عن عدم الكمال ـ أنّ أيّ منظومة رياضياتية هي دوماً غير كاملة. يعني ذلك أنه توجد في أي بنية رياضياتية دوماً مسائلُ لا يمكن البرهان على صحتها أو خطأها. لابدّ لذلك ـ في مرحلةٍ ما ـ أن يفرضَ مقتضياتٍ واجبة على صرح الفيزياء النظرية، عند أيّ محاولة لاختزال مجمل الطبيعة أخيراً في مجموعةٍ أساسية من المعادلات التعريفية. ببساطة يبدو أن ذلك سيقتضي دوماً وجودَ تجربة يمكن إجراؤها لتعطيَ نتيجةً محدّدة وصريحة، لكنْ لا يمكن التنبّؤ عنها من خلال رياضيات الفيزياء النظرية.

الرياضيات إذاً ليست خريطة طريقٍ بسيطة، ولا رقعة شطرنج عادية بقواعدَ مباشرة تسمح للحصان بالتحرك بين أي مربّعَين فيها. لقد بيَّن غودل بشكلٍ أساسي أنه يوجد دوماً مربّعٌ لا يقدر الحصان على بلوغه في رقعة شطرنجِ أي منظومة رياضياتية! تتحدّى الرياضياتُ وترفض وجودَ أيّ تحليلٍ رياضياتي تامّ، فبُنيتُها بالأحرى فوضوية مليئة بالتشوّش، وهي غير قابلةٍ لرسمها كخريطة، بل أيّ نقطتين متجاورتين ظاهرياً فيها يمكن أن تكونا منفصلتين تماماً إحداهما عن الأخرى. لا وجودَ لبرهان منطقي يشمل جميع النظريات

التي يمكن طرحها في منظومةٍ رياضياتية ما[7]؛ فلا يمكن للحصان أن يزور كلّ المربّعات في رقعة شطرنجٍ رياضياتيةٍ افتراضية!

لسوء الحظ ما رُمِي إلى ساحة الفوضى في أوائل الثلاثينيات تجاوز بكثير صرحَ الرياضيات، فلقد رحلت كذلك ما بدت أنها الحياةُ المثالية من بيئة مسالمة للعالَم الأكاديمي في ألمانيا. أدى صعودُ النازية بغيومها المظلمة والعاصفة في عام 1933 إلى صرف إيمي نوثر ـ مع غيرها ممّن ينتمون إلى الأقلّيات العرقية ـ من الخدمة في جامعة غوتنغن. لقد أعلنت وزارة العلوم البروسية قائمةً بأسماء الأساتذة من أصل يهودي، وكان اسم إيمي نوثر ضمن القائمة. وخلال بضعة أيام تمّ طردهم جميعاً، ممّا حرم أقسامَ الرياضيات والفيزياء المشهورة في أعظم الجامعات الألمانية من أحسن عناصرها. ولفترة وجيزة تولّت

---

(7) بكلماتٍ قليلةٍ نقول إنّ غودل (Gödel) برهن على أنّ أيّ منظومة رياضياتية تحتوي دوماً على «نظريات» لا يمكن البرهان على أنها صحيحة أو خاطئة. أثناء عصر هيلبرت (Hilbert) كان قد تمّ تبيان أنّ الرياضيات نفسها مكافئة منطقياً للحساب. تماثل المسلّمات ـ أو الفرضيات الابتدائية ـ للرياضيات مجموعةً مختارة من الأعداد الأوّليّة. على سبيل المثال يمكن لمنظومة رياضيات معيّنة أن تحتوي على خمس مسلّمات موافقة للأعداد الأوّليّة (2، 3، 5، 7، 11). يتمّ تمثيل النظريات القابلة للبرهان بالأعداد التي يمكن تحليلها بواسطة عناصر هذه المجموعة من الأعداد الأوّليّة. يمكن البرهان على النظرية الموافقة للعدد 44 مثلاً لأنّ 44=2×2×11 و2 و11 مسلّمتان في منظومتنا. مع ذلك لا يمكن البرهان على النظرية الموافقة للعدد 17، لأنه لا يمكن تحليله إلى عوامل أولية ضمن مجموعة المسلّمات التي اخترناها (مجموعة الأعداد الأوّليّة الخمسة الأصغر أو المساوية لـ 11). وبالتالي تكون أيّ منظومة رياضياتية محتوية على عدد منته محدود من المسلّمات «غير التامّة»: هذا هو جوهر نظرية غودل. أطلق هذا الأمرُ شبحَ إمكانية أن تكون بعضُ النظريات الكبيرة في قائمة مسائل هيلبرت الشهيرة والمخيفة هي في الحقيقة غير قابلةٍ للبرهان. ولوقتٍ ليس بالبعيد كان يُظنّ أنّ نظرية فيرما [لا توجد ثلاثية من الأعداد الصحيحة (x,y,z) تحقق $z^n = x^n + y^n$ من أجل n عدد صحيح أكبر تماماً من 2] التي تحدّت جهوداً جمّة لحلّها مرشَّحةً لامتلاك خاصّيّة غودل عن عدم التمام، ولكنْ تمّ البرهان عليها أخيراً عام 1993 عبر العمل البطولي لأندرو وايلز (Andrew Wiles) من جامعة برنستون (Princeton)، انظر: Singh, *Fermat's Enigma: The Epic Quest to Problem Solve the World's Greatest Mathematical.*

إيمي مهمة تقديم دروسٍ سرّية في الرياضيات لطلّابها في شقّتها، ولكن في غالبية الأحيانَ كان موضوع المحاورات يتحوّل لمناقشة الأحداث الراهنة. كتب هيرمان وايل (Hermann Weyl) عنها في تلك الفترة: «تُقرِّب الأوقاتُ العاصفة للنضال ـ كالتي أمضيناها في غوتنغن صيف 1933 ـ الناسَ بعضهم من بعض؛ ولذلك فإن ذكرى تلك الشهور تبقى حيّة. إيمي نوثر... شجاعتها وصراحتها وعدم اكتراثها بمصيرها وروحها المُصالِحة... قَدّمَ كلُّ ذلك لنا العزاءَ والسلوى في جوٍّ مليءٍ بالكراهية والدناءة ومحيطٍ يسوده الحزن والقنوط»[8].

دُعيت نوثر لزيارة الولايات المتحدة خلال السنة الدراسية 1934، وقبلت عرضاً لوظيفة أستاذ زائر في كلية برين مار (Bryn Mawr College) (انظر الشكل 3). قدّمت خلال هذه الفترة كثيراً من المحاضرات في برينستون، وفي صيف 1934 عادت إلى غوتنغن لتقفل شقتها وتشحن جميع أغراضها إلى برين مار. قامت حينها بتوديع أهلها وأصدقائها، ولا يمكننا هنا إلا أن نتساءل عن مصير غالبية هؤلاء الأهل والأصدقاء التي فضّلت البقاء في ألمانيا رافضةً التحذيرات من المخاوف المتربّصة.

أما بالنسبة إلى إيمي، فما بدا حياةً سعيدة جديدة في برين مار قُدِّرت له نهايةٌ مأسوية فجائية، فقد شُخِّص مرضٌ أُصيبت به عام 1935 بأنه ورمٌ كبيرٌ في المبيض، وأجريت عملية جراحية لاستئصاله في 10 نيسان/ أبريل. ولكنها بعد أربعة أيام وقعت في غيبوبة عميقة (كوما (coma))، وارتفعت درجة حرارتها إلى 109 درجات فهرنهايت. وفي النهاية وافتها المنيّة في 14 نيسان/ أبريل 1935 عن عمرٍ ناهز الـ 53 سنة، حيث ورد سببُ الوفاة الرسمي على أنها ناجمة عن جلطة قلبية.

لقد ذُكر أنّ إيمي نوثر قالت بأن السنة والنصف الأخيرة من

(8) Hermann Weyl, «Emmy Noether,» *Scripta Mathematica*, vol. 3 (1955), pp. 201-220.

عمرها كانت الفترة الأسعد في حياتها. لقد صار لها أصدقاءُ جدد، وتمّ الترحيب بها وحظيت بالتقدير الذي تستحقه في برين مار وبرنستون كما لم تلقَه أبداً في موطنها الأصلي. من الممكن أن تكون البيئة المكفهرّة الظلماء في أوروبا خلال السنوات التي سبقت وفاتها قد أضعفت جسمها. على كلّ حال لقد أعفاها موتها المبكّر من معرفة المصيرِ البائس لأقاربها وأصدقائها المقرَّبين في محرقة الهولوكوست، ووفّر عليها رؤية المثالية الأكاديمية الرائعة في ألمانيا القرن التاسع عشر تتلاشى كسراب، بعد أن تمَّ حرق العالَم الهادئ والمسالم الذي عاش فيه والدها[9].

كتب إينشتاين إجلالاً لذكرى إيمي في جريدة **النيويورك تايمز** في 4 أيار/ مايو عام 1935 يقول:

«توجد لحسن الحظ تلك الأقلّية المؤلّفة ممّن يدرك مبكّراً في حياته أن أكثر التجارب التي يمرّ بها الجنس البشري فرحاً وإرضاءً للنفس لا تأتي من العالَم الخارجي بل إنها مرتبطة بتطوّر المشاعر والإحساسات للإنسان نفسه. انتمى الفنانون والباحثون والمفكّرون الحقيقيون دوماً إلى هذا النوع من الناس. مع ذلك تصلُ بشكلٍ ومهما كانت حياة هؤلاء تمضي بشكل غير ظاهر، فإن بذورَ مغامراتهم ومحاولاتهم تبقى هي الإسهام والشيء الأثمن الذي يمكن لجيلٍ من الناس أن يخلّفه إلى الجيل الذي يليه...

... في نطاق علم الجبر الذي اشتغل فيه ولقرونٍ طوال أكثرُ

---

(9) هناك كثيرٌ من المراجع الجيّدة عن سيرة إيمي نوثر، نذكر منها: Clark Kimberling, «Emmy Noether (1882-1935): Mathematician,» faculty.evansville.edu صفحة البداية للموقع الإلكتروني لكلارك كيمبرلنغ (وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 أيار/ مايو 2004).

Auguste Dick, *Emmy Noether, 1882-1935*, Translated by H. I. Blocher (Boston: Birkhäuser, 1981); Clark Kimberling, «Emmy Noether,» *The American Mathematical Monthly*, vol. 79 (1972), pp. 136-149; James W. Brewer and Martha =

الرياضياتيين موهبةً، اكتشفت نوثر طرقاً وأساليب تبيّن أنها ذات فائدة جمّة. . . إنّ الرياضيات البحتة هي - بطريقتها الخاصة - الشعرُ والقصيدة بالنسبة إلى الأفكار المنطقية. . . ضمن هذا السعي نحو الجمال المنطقي يتمّ اكتشاف صيغ وعباراتٍ روحانية تكون ضروريةً بغرض فهم القوانين الطبيعية والتغلغلَ في معانيها بشكل أعمق. . . تتركّز مجهودات غالبية الناس على النضال في سبيل تأمين لقمة العيش، ولكنّ أكثريةً من تمّت إراحتُه من هذا النضال - إما بفضل الثروة أو الموهبة الخاصة - يجد نفسه غالباً منغمراً في نضالٍ لتحسين نصيبه في الحياة»[10].





الشكل 3: صورتان لإيمي نوثر حوالي عام 1932 - 1933 عندما كانت تزور كلية برين مار أستاذة زائرة في الرياضيات. لقد اعتبرت إيمي هذه الفترة أسعدَ فترة في حياتها. (أُخذت الصورتان من أرشيف كلية برين مار).

K. Smith, eds., *Emmy Noether: A Tribute to her Life and Work* (New York: M. Dekker, 1981); Clark Kimberling, «Emmy Noether, Greatest Woman Mathematician,» *Mathematics Teacher*, vol. 75 (1982), pp. 53-57; Lyn M. Olsen, *Women of Mathematics* (Cambridge, MA.: MIT Press, 1974), p. 141, and Sharon Bertsch McGrayne, *Nobel Prize Women in Science: Their Lives, Struggles, and Momentous Discoveries* (Secaucus, N.J.: Carol Pub. Group, 1993). =

(10) Albert Einstein, «The Late Emmy Noether: Professor Einstein Writes in Appreciation of a Fellow Mathematician,» *New York Times* (4 March 1935), p. 12.

كرّست مدينة إيرلانغن عام 1993 مدرسةً بُنيت حديثاً لإيمي، فسمّتها بـ: جيمنازيوم إيمي نوثر؛ وبالإضافة لذلك تمَّ نشر مجموعة أعمال إيمي نوثر في السنة التي تلتها. لقد دُفن رماد إيمي أسفل ممرّ آجرّي في أحد أروقة مكتبة كلية برين مار بمناسبة الذكرى المئوية لولادتها في ندوةٍ أقامتها هناك جمعية النساء في الرياضيات.

التناظر والفيزياء

تُعَدّ الرابطة الجديرة بالملاحظة بين التناظر والفيزياء مفهوماً جديداً تم تطويره خلال القرن العشرين، فقد كان الفيزيائيون قبل ذلك ينظرون إلى العالَم الفيزيائي على أنه مؤلّف من «دواليب وبكرات»، حتى جيمس كلارك ماكسويل الذي أدى دوراً رئيسياً في صياغة النظرية الكهرمغناطيسية كان يرى العالَم كمنظومةٍ حركية صرف. لم يكن الفيزيائيون قبل القرن العشرين يفكّرون بدلالة وجود مبادئ تناظرية تحتية أساسية، بل كانوا يميلون إلى اعتبار التناظر مشهداً عَرَضيّاً أو أداةً تتنشأ في وضعٍ اتفاقي يتضمّن تشكيلاتٍ متناظرة، ممّا يساعد على تبسيط فيزياء المَسألة من دون أن يؤدي ذلك دوراً عميقاً في بنية النسيج الديناميكية والعميقة للعالَم الفيزيائي.

كان إينشتاين أول من جلب هذا النوع الجديد من التفكير من خلال تطويره لنظرية النسبية الخاصة. فكّر إينشتاين بعمق في تناظرات الزمكان، واكتشف أن النسبية الخاصة مختبئة ضمن معادلات نظرية ماكسويل في الإلكتروديناميك (الديناميكا الكهربائية)، ولم يكُن ذلك ممكناً إلاّ من خلال المنظور الجديد الذي أتى به إينشتاين. لقد ابتدأت النسبية ـ كما سنرى ـ في الحقيقة مع غاليليو، وهي في مجملها تعنى بالتناظر الموجود في المكان والزمان. ومع ذلك كان المنظور الذي جلبه إينشتاين جديداً: لقد بحث عن نوعٍ من طبيعةٍ

أساسية لِيَستخرجَ منها القوانينَ الصحيحة للفيزياء، واكتشفَ هنا مبادئ تناظرية أعمق بكثير ممّا عرفه العلماءُ قبلاً. ونظرية نوثر وُلدت أيضاً من خلال نفس هذا المنظور.

إنّ مجرّد وجود تناظرات معيّنة يقتضي وجودَ القوى التي نلاحظها في الطبيعة، كما سنرى لاحقاً. نعرف الآن أنّ جميع القوى الموجودة في الطبيعة إنما تتأتى من هذه الأنواع العميقة في التناظر المسمّاة بتناظرات المعيار. قادت في نهاية المطاف فكرةُ وجود تناظرات أساسية مع نظرية نوثر إلى اكتشاف المبدأ التوحيدي الذي يحكم جميع القوى المعروفة في الطبيعة. سمح لنا فهمُ مبادئِ تناظرِ المعيار الموضعي بتحقيقِ قفزةٍ مفاهيمية كبيرة لنبلغَ مسافاتٍ ومقاييس أصغر بـِ 100000 تريليون مرّة (10^{-17}) ممّا تستطيع بلوغَه أضخم مسرّعات الجسيمات وأقوى المجاهر التي صنعها البشر. في مثل هذه المقاييس تغدو الثقالة الكمومية فعّالة، وتتحدّى جميع مفاهيمنا العادية عن المكان والزمان. مع ذلك فإننا نستطيع أن نستمرّ في اعتمادِ هذه المفاهيم والمبادئ التناظرية خلال رحلتنا المغامرة هذه. وهناك يجب علينا استخدام المبادئ التناظرية لنتخيّل توحيداً كاملاً لجميع القوى ضمن إطارِ مثل إطار نظرية الأوتار الفائقة التي تُعدّ واحدةً من أكثر النظم المحمَّلة بأفكار التناظر التي تمكّن من بنائها العقل البشري.

إن تلك التناظرات تجريدية، لكنّ الفيزيائيين يقدّسونها اليومَ لأنّها أساسية في الطبيعة. وقد توّصلنا الآن إلى اعتبارها حقيقيةً، لأننا نُقدّر عالياً نتائجَها الحذقة والدقيقة، فلو صدّقنا الحلمَ الخيالي للمحرّك دائم الحركة، فإنّ هذا يعني تخلّينا عن قانون مصونية الطاقة، وعندها سنكون مجبَرين على التخلّي عن فكرة كونِ تدفّق الزمن تناظراً يتمثّل في عدم تغيّر قوانين الفيزياء بمرور الوقت. في

الواقع ـ كما سنرى ـ يتحكّم التناظر بالطبيعة في أعمق مستوياتها، وهذا هو الدرس النهائي الذي تعلّمناه نحن أبناءَ النجوم الجبابرة في القرن العشرين.

الفصل الرابع
التناظر، المكان والزمان

يُعدّ التناظر ـ سواء أكان تعريفه واسعاً أم ضيقاً ـ فكرةً حاول الإنسان على مرّ العصور فهمها من أجل خلقِ الترتيب والجمال والكمال

هيرمان وايل (Hermann Weyl)، **التناظر** (1952)

يحتوي المكان والزمان اللذان نقطنهما نحن البشر على العديد من التناظرات. وهذه التناظرات بشكل عام واضحة وبديهية، ومع ذلك فهي أيضاً دقيقة وحذقة وأحياناً حتى غامضة. وباعتبار أنّ المكان والزمان يشكّلان المنصةَ التي يُعرَض عليها **الديناميك**، ونقصد به حركة وتفاعلات المنظومات الفيزيائية والذرات والنوى الذرية ووحيدات الخلية والناس، فإنّ تناظرات المكان والزمان تحكم التفاعلات الفيزيائية للمادة.

نحن البشر نعيش في مكانٍ ثلاثي الأبعاد يُضاف إليه بعد واحد زمني. ومن البديهي أنّه يمكننا التحرّك بحرية و**بشكل مستمر** في أيّ اتجاهٍ نريده ضمن المكان، فجميع الاتجاهات ذات منزلة متكافئة بالنسبة إلينا. بخلاف رقعة الشطرنج حيث لابدّ لقطعة الشطرنج من أخذِ خطوةٍ منفصلة لكي تقفز إلى المربّع المجاور، يبدو أنه لا وجودَ

لخطوةٍ أصغرية غير معدومة (يمكننا كشفها) يلزَم أخذها لكي نتحرّك في أرجاء المكان. لا نلاحظ مثلاً أيّ دليلٍ على أنّ كوننا ذو بنية تشبه الشبكة أو العريشة (أي إنه مؤلّف من مصفوفةٍ دورية ومنتظمة من النقاط). وبصورة مماثلة يتدفّق الوقت بشكل مستمر أيضاً، وليس في خطواتٍ منفصلة مثل تكّات الساعة، فالمكان والزمان إذاً يبدوان **مستمرَّين** ومتّصلَين.

كيف يمكننا معرفة ماهية التناظرات الأساسية للمكان والزمان؟ وكيف نستطيع أن نختبرها كي نتأكّد من أنها تناظرات فعلاً؟ كيف يمكننا أن نتجاوز ما تبلغنا إياه أعينُنا لنعرف إنْ كان ما يبدو لنا ظاهرياً على أنه تناظرات تبقى صلاحيته سارية المفعول على جميع المسافات والمقاييس؟ كيف لنا أن نعرف ما إذا كانت طبيعة المكان والزمان مستمرة ومتصلة فعلاً؟ هل من الممكن أن تتغيّر صورة العالَم عند المقاييس والمسافات دون الذرية لتصير له بنية رقعةِ شطرنجٍ منفصلة وربّما بنية مثل شبكة البلّورات أم إنه متّصلٌ ومستمرّ عندَ جميع مقاييس المسافات والأزمنة؟

مختبر الغيدانكن

يمكننا تخيّل قيامنا بمجموعة من التجارب الافتراضية التي تعالج مثل هذه الأسئلة، ويستخدم الفيزيائيون عادةً اللفظ الألماني غيدانكن إكسبيريمنت (Gedankenexperiment) ـ والذي يعني حرفياً «تجربة ذهنية» ـ من أجل هذه التمارين الافتراضية. لنتخيّل أننا نعرف مختبَراً متمرّساً ورفيعَ المستوى ندعوه بمختبر الغيدانكن (انظر الشكل 4)، وأننا قمنا بإرسال هذا المختبر إلى منطقة شاسعة من الفضاء الخالي مع منحه كلّ الوقت اللازم لإجراء مثل تلك التجارب مهما طال أمده. لقد أوكلنا بذلك إلى هذا المختبر مهمةً مطلقة وغير محدودة

لإجراء تجارب متنوعة وفي مناطق مختلفة من المكان والزمان اللذين يملآن كوننا.

تمّ إطلاق مختبر الغيدانكن وتكليفه بالقيام بقياس **الثوابت الأساسية** أو **الوسائط ـ البارامترات** التي تظهر في معادلات الفيزياء، وهي المعادلات التي تسمح لنا بالتنبّؤ بكيفية سلوك شيءٍ ما تحت شروطٍ معيّنة. وتمّ تحليل تلك البارامترات الأساسية بعد أن قيست بدقة في جميع أرجاء الكون[1].

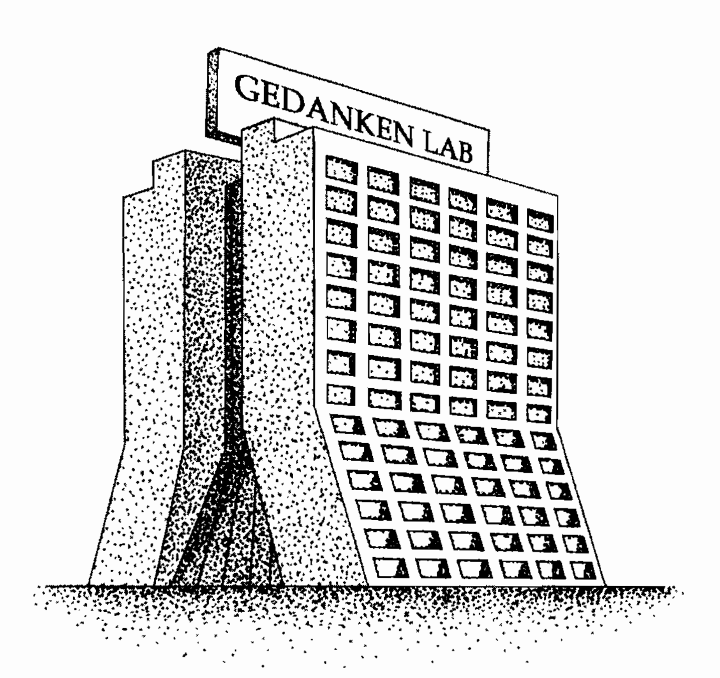
من بين الأشياء الكثيرة التي قام مختبر الغيدانكن بقياسها كانت **سرعة الضوء**. لقد أجرى مختبر الغيدانكن قياسات متعدّدة لسرعة الضوء في أماكن مختلفة من أرجاء الكون مقارناً النتائج بعضها ببعض في أثناء تجواله. قارَن مختبر الغيدانكن نتائج قياساته في نقاطٍ مختلفة من الفضاء تفصل بينها مسافات شاسعة، وقام كذلك بفضل مجاهره ومسّرعاته الضخمة بمقارنة قوانين الفيزياء في نقاط من الفضاء تبعد عن بعضها البعض بمسافات دون ذرية (بل دون كواركية في

---

(1) نورد هنا قائمة جزئيّة للبارامترات (الوسائط) الأساسية في الطبيعة. وهي بعضُ ما يمكن لمختبر الغيدانكن قياسُه أثناء تجواله في كوننا:

البارامتر	الرمز	القيمة	الوحدة
سرعة الضوء	c	$2,99792458 \times 10^{8}$	م\ثا (m/s)
ثابت بلانك	$\hbar$	$1,054571596 \times 10^{-34}$	م^2 كغ\ثا (m^2 kg/s)
ثابت نيوتن	G_N	$6,673 \times 10^{-11}$	م^3\كغ ثا^2 (m^3/kg s^2)
وحدة الشحنات الكهربائية	e	$1,602176462 \times 10^{-19}$	كولون (Coulombs)
كتلة الإلكترون	m_e	$9,10938188 \times 10^{-31}$	كلغ (kg)
كتلة البروتون	m_p	$1,67262158 \times 10^{-27}$	كلغ (kg)

الحقيقة). وسجّل المختبر بدقة الأزمنةَ التي أُجرِيَت فيها هذه التجارب.



الشكل 4: مختبر الغيدانكن (رسم شي فيريل (Shea Ferrell)).

لقد أجرى المختبر هذه التجارب في لحظاتٍ مختلفة عديدة على مدى عمر الكون، وامتدّت فترة الاختبارات منذ لحظة بدايته وخلال معظم مراحل تطّوره خلال التاريخ، كما أجريت الاختبارات بدقة هائلة على فواصل زمنية في غاية الضآلة. إضافةً لذلك زُوّد المختبر بمحرّكات نفّاثة كي تسمح له بتغيير اتجاهه نسبةً إلى بقية الكون، حيث أجرى المختبر كلّ هذه التجارب متقصّياً إمكانية وجود اختلافاتٍ طفيفة في سرعة الضوء باختلاف

اتجاه المختبر في الفضاء. لقد حاول المختبرُ معرفةَ ما إذا كان هناك اعتمادٌ للقيم الملاحَظة للوسائط الفيزيائية التي تظهر في قوانين الطبيعة على اتجاه المختبر نحو «الأعلى» أو «الأسفل» أو إلى «اليمين» أو «اليسار» أو نحو «الأمام» أو «الخلف». هل كانت سرعة الضوء المتجّه نحو الأعلى مختلفةً عنها عندما يتجه نحو الأسفل؟ هذا هو نمط الأسئلة التي حاول مختبر الغيدانكن الإجابة عنها.

يمكن إجراء هذه القياسات ـ من حيث المبدأ ـ على مسافاتٍ صغيرةٍ جداً من خلال مراقبة سلوك الذرات والنوى أو ملاحظة خصائص المادة عندما نغيّر من حركة أو اتجاه مكوّناتها في المكان. على سبيل المثال، عندما يتحرك الإلكترون ضمن حقل مغناطيسي، فإن خصائص هذه الحركة تعتمد بشكل جوهري على سرعة الضوء، فلو كانت حركة الإلكترون هي نفسها بقطع النظر عن الاتجاه المكاني، فإنّ هذا الأمر سيبيّن بشكل غير مباشر ما إذا كان الضوء يتحرّك بالسرعة نفسها في الفراغ بصرف النظر عن اتجاهه أم لا.

يُصاغ هذا السؤال في اللغة المزخرفة التي يستعملها العلماء بالقول: «هل المكان **متناظرٌ كروياً**؟» ونعني بهذا: هل المكان هو نفسه في جميع الاتجاهات؟ أم أنّ هناك اتجاهات «مفضَّلة» أو خاصة في المكان؟ إذا كانت سرعة الضوء مختلفةً عندما يتحرّك في اتجاه معيّن ـ ولنقل مثلاً نحو نجم القطب الشمالي، بولاريس ـ فإننا سنضطر إلى الاستنتاج أن الفضاء **غير متناظرٍ كروياً!**

تمّ أخيراً تجميع ودراسة نتائج قياسات سرعة الضوء التي أجراها مختبر الغيدانكن، وتمّ إعلانها إلى مجتمع العلماء في مؤتمر علمي كبير بين الكواكب. ما صرّح به الغيدانكن كان إجابةَ **نفي** قاطعة! فقد وجد الغيدانكن أن سرعة الضوء تبقى نفسها في جميع الاتجاهات،

وبالتالي **يبدو فعلاً أن الفضاء متناظرٌ كروياً**. وجد المختبر أنّ هذه الحقيقة صحيحة سواء من أجل المسافات الصغيرة أو الكبيرة. والأكثر من ذلك فقد اكتشف المختبر أنّ سرعة الضوء لم تتغيّر بمرور الزمن، وأنها بقيت نفسها في جميع الحالات الحركية للمختبر. هذه تناظرات يتمتع بها الضوء، ولكنها في معنى أوسع تناظراتٌ أساسية يمتلكها المكان والزمان.

نُشِرت في نهاية الأمر نتائج تجارب مختبر الغيدانكن، وبيّنت هذه النتائج المذهلة أن أياً من قوانين الفيزياء ـ ولغايةِ درجةٍ عاليةٍ جداً من الدقة العلمية ـ لم يعتمد على موقع المختبر في المكان (الانسحابات في المكان) ولا على زمنه (الانسحابات في الزمان) ولا على كيفية اتّجاهه (الدورانات في المكان). إضافةً إلى ذلك لم تعتمد نتائج القياسات المُجراة داخل مختبر الغيدانكن على حالة الحركة المنتظمة للمختبر، ويعني هذا الأمر أنّ المرء لا يقدر على تمييز ما إذا كان المختبر متحرّكاً ضمن الفضاء أم ساكناً. من الواضح إذاً أنه في ما يخصّ النتائج التجريبية في مختبر الغيدانكن، تكون جميع حالات الحركة للمختبر واتّجاهاته ومواقعه ولحظاته الزمنية متكافئة في ما بينها[2].

---

(2) في ضوء هذه النتائج هناك ملاحَظةٌ محيّرةٌ بشكلٍ لافتٍ للنظر. وجد مختبرُ الغيدانكن أنّ مجملَ المادة في الكون تبدو ممتلكةً لحالةِ حركةٍ مفضَّلة، بينما تكون جميع القوانين الفيزيائية مستقلةً عن الحالة الحركية للمنظومة. يعني ذلك أنّ هناك حالةً حركيةً مميَّزةً ذات سرعة خاصّة تبدو بالنسبة إليها الحركةُ الوسطية لجميع المجرّات ولمجمل الإشعاع الحراري المتبقّي في الكون مساويةً للصفر. إذا أخذنا أيّ مجرّة فإنها بالطبع تتحرّك بسرعة كيفية ما، ولكنّ المجرّات في مجملها تعرّف حالةً حركيّة خاصّة. مع ذلك لا تعتمد قوانين الفيزياء ـ المتضمَّنة في قياسات سرعة الضوء وكتلة الإلكترون وغيرها من المقادير الفيزيائية ـ على الحالة الحركية للمختبر.

ولنفحص الآن هذه التناظرات الأساسية للمكان والزمان بتفصيل أكثر.

الانسحابات المكانية

يتمتّع المكان العادي (في كوننا) بتناظرِ انسحابي مستمر، أي إنّ قوانين الفيزياء تبقى نفسها في كلّ مكان. إنّ المكان **ليس** شبكةً بلّورية ولا رقعة شطرنجٍ يستلزم الانتقال والانسحاب فيهما خطواتٍ منفصلة؛ ويعني ذلك عدمَ وجود خطوة أصغرية للانسحاب والانتقال في المكان الذي نعيشه، وذلك لغاية المسافة الأصغر التي نستطيع تمييزها اليوم والبالغة 10,000,000,000,000,000,000 /1 أو (10^{-19}) متر. يمكن باستخدام طرقٍ غير مباشرة الاستدلال على عدم تغيّر المكان عند إجراء الانسحاب لغاية مسافاتٍ أقصر تصل لمرتبة 1000,000,000,000,000,000,000,000 /1 أو (10^{-24}) متر. أما بالنسبة إلى المسافات الأصغر من ذلك، فلسنا متأكّدين تماماً من صلاحية هذا النوع من التناظر عندها. ومع ذلك ـ من خلال تطبيق بعض الأفكار النظرية ونظرية نوثر ـ هناك أدلة مقنعة على أنّ هذا التناظر يبقى صالحاً دوماً.

يدعو العلماء المكان **بالمتّصل** أو المستمر، وتأتي الفكرة في الحقيقة من الرياضيات البحتة، حيث يتألّف المستقيم العددي من **الأعداد الحقيقية.** تحتوي هذه الأعداد على **الأعداد العادية** التي يمكن كتابة أيّ منها بشكل نسبة بين عددين صحيحين، ولكنها تحتوي كذلك على **الأعداد غير العادية** من أمثال π أو $\sqrt{2}$ التي «تملأ الفراغ بين» الأعداد العادية. لا يمكن تعريف مفهومِ المجاورِ الأقربَ بالنسبة إلى أي عدد حقيقي، ويعني ذلك أنه إذا أُعطيتَ العدد 3 مثلاً فلا وجود لعددٍ يمكن اعتباره الأقرب بالنسبة إلى 3. بمقابل ذلك، **لا**

يكون خطّ الأعداد الصحيحة (الأعداد التي نستخدمها عند العدّ العادي 1، 2، 3 ... إلخ) متّصلاً، وذلك لوجود خطوة مساوية للواحد تفصل بين أي عددين صحيحَين متجاورَين مثل 6 و7 (للعدد الصحيح 3 مجاوران هما الأقرب بالنسبة إليه: 2 و4).

لا يوجد في مكاننا الاعتيادي ـ لغاية مقاييس المسافات الصغيرة التي يمكننا تمييزها ـ خطوةٌ أصغرية ينتقل بها الكوارك أو الإلكترون أو الذرة أو أي كوكب في الفضاء. وبسبب ذلك نعتمد فرضيةَ عدم وجود مقياسِ مسافةٍ أصغري في المكان. يمكن التفكير بعملية إجراءِ انسحابٍ في متّصل المكان على أنها تتالٍ لعدد صحيحٍ من الخطوات الأصغرية المنفصلة، لأنه لا وجود لخطوة أصغرية. يقتضي غياب الخطوة الأصغرية في المتّصل عدداً لانهائياً من عمليات التناظر الانسحابي الممكنة. لقد اكتشف مختبر الغيدانكن أنّ لكوننا تناظراً انسحابياً مستمراً وثلاثي الأبعاد. لكنْ من ناحيةٍ أخرى يجب أن نركّز هنا على أنّ هذه الفرضية مبنية أساساً على الملاحظة، فلو أثبتت التجارب المستقبلية ـ مع مسرّعات أكثر قدرة تسبر الفضاء لمسافاتٍ أصغر فأصغر ـ وجودَ بنيةٍ تحتية شبيهة بشبكة البلورات، فعندها ستكون بنية كوننا هي بهذه الصورة. على كلّ حال تبدو فرضيةُ المتّصل المكاني مع وجود تناظر انسحابي مستمرّ فرضيةً صالحة بالنسبة إلينا لغاية اليوم.

لنتناول مؤشّرةَ سبّورةٍ تُستعمَل في قاعة صفّ ما. هذه المؤشّرة تكون عادةً عبارة عن عصا خشبية طولها ثابت، حوالي المتر (أي أطول قليلاً من اليارد)، ويمكننا أن ننقلها ونسحبها بحرية في المكان عبر تحريكها كما نريد، فهل تتغيّر خواصّها الفيزيائية عند إجراء هذا الانسحاب؟ من الواضح أنّ هذه الخواصّ لا تتغيّر. إنّ المادة الفيزيائية ـ أي الذرات وطريقة انتظامها ضمن الجزيئات المكوِّنة

بدورها للمادة الليفية التي يتألف منها الخشب ـ لا تتغيّر بطريقة واضحة عندما ننقل المؤشِّرة ضمن الفضاء. لا تتغيّر كذلك هذه الخصائص إذا ما أشرتَ بالعصا إلى كريستينا أغيليرا(*) (Christina Aguilera) أو أشرتَ إلى الباب، فلن يتغيّر لا لونُ المؤشِّرة ولا طولها ولا كتلتها عندما ننقلها في المكان. هذا تناظرٌ للمؤشّرة بالنسبة إلى الانسحابات، ولكنه في حقيقته تناظرٌ أوسع يصلح لجميع قوانين الفيزياء: إنه يصف معنى التصريح القائل بأنّ قوانين الفيزياء متناظرة بالنسبة إلى الانسحابات المستمرة الثلاثية الأبعاد في المكان، فذرّات الخشب لا تتغيَّر بأيّ طريقةٍ كانت عندما ننقل المؤشِّرة ونسحبها، لأن قوانين الفيزياء التي تحكمها هي نفسها هنا وهناك.

يجب على كلّ **معادلة رياضياتية** نكتبها لوصف الكواركات أو اللبتونات أو الذرات أو الجزيئات أو الإجهادات أو معاملات الكتلة(**) (Bulk Moduli) أو المقاومة الكهربائية... إلخ (أو لمجرّد التعبير عن طول المؤشّرة) أن **تتمتّع هي نفسها بالتناظر**، وأن تكون صامدة لا تتغيّر عند إجراء الانسحاب في المكان، فيجب تطبيق نفس المعادلة بغضّ النظر عن موقعنا في المكان الفارغ. إن هذا تبصّرٌ خلّاق! ولكن ما معنى وجوب أن تكون المعادلة متناظرة وغير متغيّرة؟

لنتناول المثال الأبسط عن معادلةٍ تتمتّع بالتناظر. نريد أن نصفَ طولَ مؤشّرةِ قاعة الصف، ولنرمز له بـ L. لنفترض أن لدينا شريط قياسٍ ملتفّاً على بكرة، وأننا قمنا بمدّه على طول المؤشرة. يمكننا

(*) مغنية بوب أميركية، وُلدت سنة 1980.

(**) يعبِّر معامل الكتلة عن التغيّر النسبي في حجم مادةٍ ما عندما تتعرض لضغطٍ منتظم قدره وحدة الضغط.

وضع المؤشرة حيث نريد بموازاة شريط القياس من أجل قياس طولها، وكلّ ما نحتاجه هو تحديد موضع رأس قمّة المؤشرة المتمثّل بعلامة على الشريط x_{tip}، ولنفرض أننا وجدنا ($x_{tip} = 79$) إنشاً. ونحتاج كذلك إلى قياس موضع نهاية مقبض المؤشرة x_{handle} في الوقت نفسه، ولنفرض أننا وجدنا ($x_{handle} = 49$) إنشاً. سيتبيَّن لنا عندها أنّ طول المؤشرة يبلغ 79 ـ 49 = 30 إنشاً، وبشكل أعمّ إنّ **الصيغة** الرياضياتية لطول المؤشرة هي $L = x_{tip} - x_{handle}$[3].

لنتخيّل الآن أنّ هناك طالبَ ثانويةٍ علمية اسمه شيرمان (Sherman)، وهو شخص ودود يسكن في الجوار، وقد أتى وعبث بشريط القياس، فضغط على الزر الأصفر ليرى الشريط يندفع منغلقاً على نفسه عدة مرات. يُعيد شيرمان بعد ذلك قياس طول المؤشّرة عبر مدِّه للشريط مرة أخرى ووضعِه على المنضدة بموازاة المؤشرة. لكنّ شيرمان يجد هذه المرة وبشكل متواقت أنّ $x_{tip} = 54$ إنشاً وأن $x_{handle} = 24$ إنشاً. يبدو إذاً أن قياسَي موضعَي رأس قمة المؤشّرة ومقبضِها قد تغيّرا نتيجةً لـ**تحويلٍ** أو لـ عمليةٍ أجريت على منظومة شريط القياس والمؤشّرة، إذ إن المؤشّرة قد **انسحبت وانتقل موضعها في المكان بالنسبة إلى شريط القياس**. ومع ذلك هناك **تناظر** ـ تناظر **الصمود (عدم التغيّر) الانسحابي** ـ لأنّ طول المؤشرة لم يتغيّر، فهو لا يزال (30 = 24 = 54) إنشاً.

وهكذا نجد أنّ الصيغة الرياضياتية نفسها $L = x_{tip} - x_{handle}$ تتمتّع بتناظرٍ. نستطيع إجراء **عمليةٍ** تنصّ على **تحويل** قيمتَي x_{tip}

---

(3) غالباً ما نأخذ القيمة **المطلقة** (أو الموجبة) للفرق، ونعرّف الطول على أنه $L = |x_{tip} - x_{handle}|$. عند مناقشة النظرية النسبية لاحقاً نعرّف **الفاصل** على أنه $L = |x_{tip} - x_{handle}|$، وبالتالي فالفاصل أساساً هو الطول ولكنْ يمكن لقيمته أن تكون سالبة.

وx_{handle} عبر انسحابٍ في المكان، ومن أجل تحقيق ذلك نستبدل بهاتين القيمتين قيمتين جديدتين (يُشار إليهما بالفتحة): $x'_{tip} = x_{tip} + D$، و$x'_{handle} = x_{handle} + D$. تعبّر D عن المقدار الذي أزحنا به - أو سحبنا ونقلنا به - المؤشّرةَ في المكان بالنسبة إلى شريط القياس. ولكنّ ذلك لا يؤثّر على نتيجة الصيغة التي تعبّر عن طول المؤشّرة: $L = x'_{tip} - x'_{handle} = x_{tip} + D - (x_{handle} + D) = x_{tip} - x_{handle}$. يقتضي هذا التمرين البسيط أنّ النتيجة النهائية لطول المؤشرة **لا يعتمد** على مقدار الانسحاب D، فهذا الأخير يَحذف نفسه بنفسه ويسقط من الإجابة النهائية بقطع النظر عن القيمة التي يأخذها. نقول إذاً إن الصيغة **لا متغيّرة** عند إجراء عملية انسحاب المؤشرة في المكان، ونقول أيضاً إن صيغتنا «تُظهر تناظراً انسحابياً». إنّ التناظر موجود لأنّ المعادلة لا تشير إلى أيّ نقطة خاصة في الفضاء حيث إنّ الأخير لا نقاطَ متميّزة فيه. ويجب أن يكون كلّ ذلك صحيحاً لأن المعادلة نفسها تعكس حقيقةَ عدم تغيّر قوانين الفيزياء عند إجراء الانسحابات في المكان.

الانسحابات الزمانية

يمكننا أن نعتبر الزمان مشابهاً للمكان، ويمكننا تخيّلُ نقلِ منظومةٍ فيزيائية **عبر الزمان**. نستطيع على سبيل المثال دراسة خصائص الكوارك العلوي - وهو أثقل الجسيمات الأولية المُكتشَفة لغاية اليوم - في مخبر مسرّع فيرمي الوطني (الفيرميلاب (Fermilab)) في الساعة 9 صباحاً، ثم ندرسها نفسها في الساعة 3 ظهراً. هل تعتمد الخصائص الذاتية للكوارك العلوي - كتلته وشحنته الكهربائية وغيرها - على اللحظة الزمنية التي خُلق فيها؟ أخبرنا مختبر الغيدانكن الافتراضي - بعد إتمامه للتجربة الموافقة - أن الإجابة هي **لا**! وحيث إن خصائص الكوارك العلوي تعكس ببساطة

قوانينَ الفيزياء فإننا نكتشف إذاً **أنّ قوانين الفيزياء لا متغيّرة عند إجراء انسحاباتٍ في الزمن.**

يعني ذلك أنّ نتيجة أي تجربة ـ سنجريها غداً أو بعد خمس سنين أو قمنا بإجرائها قبل عشر ثوانٍ وهلم جراً ـ تبقى نفسها. إنّ جميع قوانين الفيزياء ـ ومن ثم جميع المعادلات الصحيحة في الفيزياء ـ لا متغيّرة عند إجراء الانسحابات في كل من المكان والزمان. يمثّل هذا الأمر حقيقةً تجريبية بقدر ما نستطيع تمييزه بإمكانياتنا الحالية.

يتوّجب علينا ألاّ نركن إلى كلمة علماء مختبر الغيدانكن وحدهم، فالثبات العام لوسائط الفيزياء عبر مسافات شاسعة وأزمنة طويلة تمّ إثباته في الواقع انطلاقاً من الملاحظات الفلكية والجيولوجية، مثل إنتاج عنصر السماريوم الفلزي (Samarium) في المفاعل النووي الطبيعي في منجم أوكلو، وذلك لغايةِ دقةٍ تقارب جزءاً واحداً من عشرة ملايين جزء على مدى فترةٍ من رتبة حياة الكون ـ التي تساوي تقريباً ثلاثة عشر مليار سنة! الأكثر من ذلك أنّ منجم أوكلو لا يمثّل ظاهرةً منفردةً هنا، بل هناك كثير من الدلائل الأخرى على ثبات واستقرار القوانين الفيزيائية عبر مجمل الزمن، فالفلكيون يستطيعون أن يمعنوا النظر في النجوم البعيدة للمجرات، ليجدوا أن نفس العمليات الفيزيائية تجري في تلك الأجسام القاصية والموغلة في القدم مثلما تحدث هنا في مختبراتنا على الأرض اليوم. ومقدار الوفرة النسبية لبعض العناصر في الأحجار النيزكية يخبرنا أنّ إجرائياتٍ أخرى حسّاسة للغاية هي اليوم نفس ما كانت عليه قبل مليارات من السنين. وفي سبعينيات القرن العشرين سمحت لنا مركبةُ محطةِ الفايكنغ (Viking Lander) ـ التي أرسلتها وكالة ناسا إلى

كوكب المريخ - بإجراء قياسات دقيقة لقوة الثقالة[4]، وبيّنت هذه القياسات أن قوة الثقالة بدورها لم تتغيّر عبر الزمن. إذا جمعنا كل ذلك سويةً يتبدّى لنا أنّ جميع الدلائل التجريبية تؤيّد صحة الفرضية المعقولة عن ثبات قوانين الفيزياء وعدم تغيّرها مع مرور الزمن.

مرةً أخرى يعني ما ذكرناه أنّ وصفنا للطبيعة - أي المعادلات الفيزيائية التي نعتمدها لهذا الوصف - يجب أن يتمتّع أيضاً بذلك التناظر عبر الزمن، فعلى المعادلات نفسها أن تكون لا متغيّرة عند إجراء انسحابٍ في الزمن. تتضمّن المعادلات زمناً كيفياً t وأشياءَ أخرى خاصة تحدث في أزمنة مختلفة ... $t_1, t_2,$. على سبيل المثال، يمكنني أن أُسقط كرةً من أعلى برج بيزا المائل في اللحظة = t_1 9:00:00 ق.ظ (قبل الظهر)، وأريد حساب مقدار المسافة التي قطعتها الكرة بعد ثانية واحدة أي في اللحظة 9:00:01 = t_2 ق.ظ. الأمر المهمّ هنا هو أنّ أيّ معادلة صحيحة تصف التطور الزمني يمكننا فيها أن نستبدل بالأزمنة القديمة أزمنةً حديثةً ناجمةً عن انزياح القديمة بمقدارٍ ثابت. يعني ذلك أننا نستطيع وبشكل مكافئ استعمال $t+T$ وt_1+T و t_2+T، فالمقدار T سوف يسقط في أيّ معادلة صحيحة أستعملها لوصف الحركة، تماماً كحال الانسحاب D في مثالنا السابق عن الانسحابات المكانية. إذا اخترت $T=3$ ساعات عندها ستحدِّد المسألة الفيزيائية أعلاه أين ستكون الكرة في اللحظة 12:00:01 ب.ظ (بعد الظهر) إذا تمّ إسقاطها في اللحظة 12 ظهراً تماماً. تبقى نتيجة الارتفاع الذي تسقطه الكرة (من أعلى البرج وخلال ثانية واحدة) كما هي أي نفسها تماماً مهما كانت اللحظات التي نختارها، وذلك لأنّ

(4) Christopher T. Hill, Michael S. Turner and Paul J. Steinhardt, «Can Oscillating Physics Explain an Apparently Periodic Universe?» *Physics Letters*, B 252 (1990), pp. 343-348, and References Therein.

قوانين الفيزياء لا متغيّرة عبر الانسحاب الزماني[5].

لقد رأينا أن مصونيةَ الطاقة تُعتبَر نتيجةً لعدم تغيّر قوانين الطبيعة مع تغيّر الزمن (جوهر نظرية نوثر). يمكننا في الواقع أن نقلبَ الحجّةَ بالاتجاه المعاكس، فنستخدم ملاحظتَنا لصحة مصونية الطاقة من أجل استنتاج عدم تغيّر قوانين الفيزياء مع الزمن. سنجد هنا أنه يتوّجب على قوانين الفيزياء ألاّ تكون متغيّرةً موضعياً: خلال مقاييس زمنية فائقة الصغر تصل لمرتبة 10,000,000,000,000,000,000,000,000,000/ 1 (10^{-28}) ثانية! يمكننا أيضاً الاستدلال على صحة ثبات قوانين الفيزياء

---

(5) هناك سؤال يقلق الكثيرين بخصوص هذه النقطة، ويتعلّق بطبيعة كيفية وصف الفيزياء للأشياء. رأينا أنّ كلا نوعي التناظرات الانسحابية المكاني والزماني صالحان. مع ذلك بينما أستطيع أن أنقل نفسي بسهولة في المكان، يبدو أنني لا أملك الحرية لأنقل نفسي عبر الزمن. تنتمي أفكارُ الرحلات عبر الزمن إلى الخيال العلمي وليس إلى الحقيقة. علاوة على ذلك وبالرغم من قدرتي على رؤية سلسلة من الجبال ومشاهدة الأبعاد الثلاثة للمكان، فإنني أشعر فقط بلحظةٍ واحدة زمنية، فأنا لا أقدر على رؤية مجمل التاريخ كما لو كان سلسلةَ جبالٍ (كما في رواية (*Trafalmadorians*) لـ كيرت فونيغات (Kurt Vonnegut)، ولا أنا قادر على عبور سلسلة الجبال الزمنية هذه كما هو الحال مع الجبال المكانية. أستطيع أن أتذكّر أحداثاً حصلت في الماضي، ولكنني لا أستطيع أن أتذكّر أحداثاً في المستقبل. إنني ـ كما يقول الصينيّون ـ «متجه بظهري إلى المستقبل»، لأنّ «عينيّ» لا تستطيعان الرؤية إلاّ باتجاه الماضي. لماذا يكون **الإحساس** بالزمن مختلفاً هكذا عن الإحساس والشعور بالمكان؟ إنّ الكلمةَ المفتاحَ هنا هي كلمة «الإحساس»، فـ «سهم (مؤشّر) الزمن» متعلّق بإدراكنا الحسّي للحظة «الآن»!! هذا الأمر في الحقيقة ليس قسماً من الفيزياء بل ينتمي إلى مجال الوعي البشري، وندعوه بـ «مسألة الـ C» (الحرف الأول من كلمة (Consciousness)). لقد قمنا بتسجيل ذكرياتٍ عن الحوادث التي حصلت خلال وجودنا، ويقوم دماغنا باستمرار بمقارنة الأحداث الجديدة بهذه الذكريات، مّما يخلق واجهةً (صلةً) بينية قابلة للإدراك حسّياً تربط بين المستقبل والماضي ونشعر ونحسّ بها على أنها اللحظة «الآن». تتمّ صياغةُ جميع أسئلة الفيزياء على نحوِ السؤال التالي: «بفرض أنّ «الشيء» ابتدأ في الموضع x_1 عند اللحظة t_1، فأين سيكون موضعه عند اللحظة t_2؟». نرى إذاً أنّ تناظر الانسحاب الزماني يعني أنّ سؤالنا التالي ستكون له الإجابة نفسها عن السؤال الأول: «بفرض أنّ «الشيء» ابتدأ في الموضع x_1 عند اللحظة $t_1 + T$، فأين سيكون موضعه عند اللحظة $t_2 + T$؟».

خلال مقاييس زمنية أصغر حتى من التي ذكرناها، وذلك من خلال قيود غير مباشرة متأتّية من عمليات نادرة جداً تتضمّن انحلال وتفكّك الكواركات الثقيلة (وهي جسيماتٌ صغيرة جداً سنتعرّض لها في الفصول اللاحقة).

الدورانات

لنتناول زجاجة خمرٍ وننزع عنها اللصاقة الورقية المكتوب عليها الاسم. سنرى عندها أنّ إجراء **تحويل دوران** للزجاجة بواسطة تدويرها حول الشاقول «محور تناظرها» لن يغيّر شيئاً في المظهر الفيزيائي للزجاجة. نستطيع أن نأخذ صوراً للزجاجة قبل تحويل الدوران وبعده، وسوف نلاحظ غيابَ أيّ اختلاف في هذه الصور. يمكن أن توجدَ أشياء أخرى في الصورة مثل علبةِ جبنةٍ مدوَّرة أو سلةِ فاكهة، ومع ذلك إذا ما دوّرنا الزجاجة بحذر حول محور تناظرها فإن مشهد الصورة لن يتغيّر (انظر الشكل 5).

إنّ محور التناظر هو مستقيم خيالي يمر ضمن الزجاجة من مركز قاعدتها إلى السدادة في فوهتها، ومثل هذا المحور سنجده يبقى ثابتاً عند إجراء الدوران. وجدير بالملاحظة أنه من المهم اقتلاع لصاقة الاسم، لأنها إشارةٌ يتغيّر موضعها بشكل واضح عند التدوير.

إذاً لا يتغيّر مظهر الزجاجة عند تدويرها بزاوية كيفية نختارها كما نريد. وهذا التناظر ينسحب على ما هو أبعد من مجرَّد المظاهر الخارجية، فأيّ منظومة فيزيائية ـ مثل ذرات الزجاج نفسه أو السدادة في فوهة الزجاجة أو بقايا الخمر داخلها ـ لا تُغيّر من **خواصها الفيزيائية** بأيّ طريقة كانت عندما ندوّر المنظومة، فالتناظر هنا ليس تناظراً ظاهرياً فحسب بل هو تناظر شامل في الفيزياء ككل؛ إذ إنّ المكان نفسه لا اتجاه مفضَّل لديه، وبالتالي فإنّ قوانين الفيزياء لا تعرف الاختلاف بين اتجاهات «نحو الأعلى»

و«نحو الأسفل» و«نحو الأمام» و«نحو الخلف» و«نحو الجانبين».

اكتشف مختبر الغيدانكن أنّ للمكان تناظرات دورانية مستمرة تتجلّى في القوانين الفيزيائية التي تحكمه، فتناظره مطابقٌ للتناظر الدوراني الكامل لكرةٍ مثالية ثلاثية الأبعاد. يمكن تدوير الكرة (أو المنظومة الكروية) حول أيّ محورٍ يمرّ في مركزها، ويمكن أن تأخذ زاوية الدوران أيّ قيمةٍ نريدها، ولنعطِها مثلاً قيمة ثلاث وستين درجة. بعد إتمام هذا الدوران (وهو ـ مرة أخرى ـ «عملية» أو «تحويل») لا يتغيّر مظهر الكرة، لذلك نقول إنّ الأخيرة «لا متغيّرة» عند إجراء «تحويل» الدوران حول المحور بزاويةِ ثلاث وستين درجة عليها. وستكون أيُّ صيغةٍ رياضياتيةٍ نستخدمها لتوصيف الكرة غيرَ متغيّرة (صامدة) عند إجراء هذا الدوران.

هناك عدد لانهائي من عمليات التناظر (الدورانات) التي يمكن تطبيقها على الكرة. إضافةً إلى ذلك لا وجود لدورانٍ أصغري غير معدوم يمكن تحقيقه؛ إذ إننا نستطيع الاستمرار في إجراء دوراناتٍ أصغر فأصغر من دون أيّ توقّف (أو القيام بما يُدعى دورانات «متناهية الصغر» إلى الدرجة التي نريدها). ولهذا نقول إنّ التناظر الذي تتمتّع به الكرة مستمر.

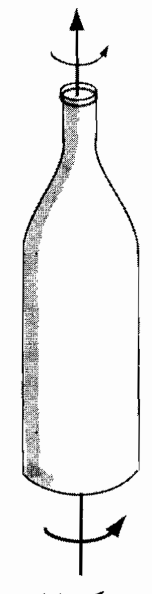
إنّ التناظر الدوراني في القوانين الفيزيائية هو **تناظر مستمر**، لأنّ قيّم زوايا الدوران كيفية أي يمكن أن تأخذ المقدار الذي نختاره. ومن الواضح أنّ هناك عدداً لانهائياً من عمليات التناظر التي يمكن تطبيقها على الدائرة أو على الكرة. ومرة أخرى نذكر أنّه لا وجود لدورانٍ بزاوية أصغرية غير معدومة، ولهذا نقول إنّ تناظر الدائرة والكرة مستمر، ونقول أيضاً إنّ الكرة ـ أو الدائرة ـ **لا متغيّرة** عند إجراء **تحويلٍ** تدور بموجبه حول أيّ محور يمرّ من مركزها بزاوية 56.54862... درجة أو (p/10) راديان أو أيّ زاوية أخرى نختارها. على عكس ذلك، لا تبدو المروحة ذات الشفرات الثلاث ـ أو المثلث

المتساوي الأضلاع ـ بالمظهر نفسه عند تدويرها إلاّ إذا كانت زاوية الدوران مساويةً لـ 120 أو 240 أو 360 درجة، ممّا يعطينا مثالاً عن **تناظرٍ متقطّع** ومنفصل. للتناظرات المتقطّعة خطواتٌ أصغرية غير معدومة، وهذا هو أساس كونها عمليات تناظر «منفصلة ومتقطّعة». إن التناظر المستمر بعدده اللانهائي من عمليات التناظر هو تناظر «أكبر» من التناظر المتقطّع، وبالتالي تضع التناظرات المستمرة قيوداً أكبر على بنية المكان والزمان. ومع ذلك يتبيَّن في النهاية أن دراسة وتحليل التناظرات المستمرة أسهل رياضياتياً من التناظرات المتقطّعة، إذ تتوفَّر لدينا في حالة التناظرات الأولى تقنيات الحساب التفاضلي القوية، أما الأخرى فتجلب معها تحدّيات ومشاكلَ عديدة جداً عند تحليلها.

لا تعتمد القوانين الفيزيائية على كيفية توجيه المخبر في المكان، فبدلاً من تدوير الكرة، يمكننا في الحقيقة أن ندوّرَ أنفسنا حول الكرة الثابتة في المكان ـ كما تدور الكواكب حول الشمس ـ وستبدو لنا الكرةُ نفسَها فيزيائياً. يرتبط إذاً التناظر الدوراني للشيء الكروي بعلاقة وثيقة مع التناظر الدوراني الأعمّ للمكان نفسه. في الواقع لا يمكننا تمييز إدارةَ جسمٍ كروي عن إدارةِ الكون أجمع حول هذا الجسم الكروي!

نستطيع اختبار هذا الأمر ـ على الأقلّ من حيث المبدأ ـ عبر إجراء بعض التجارب في الفيرميلاب (وليس في مختبر الغيدانكن هذه المرة). إذا قمنا بقياس كميةٍ فيزيائيةٍ ما، مثل تفاصيل الطريقة التي تتفكّك فيها «ميزونات الـ K حيادية الشحنة» (K-meson) (وهي نوعٌ خاص من الجسيمات الأولية التي سنلتقي بها لاحقاً) عندما تتحرّك في اتجاه معيّن في المكان. ثم تحقّقنا مبدئياً من حصولنا أو عدم حصولنا على النتيجة نفسها في الساعة 6 مساءً مقارنةً مع نتيجة

الساعة 12 ظهراً. علينا هنا أن نكون حذرين ودقيقين جداً للتأكّد من غياب أيّ أخطاء منهجية في أجهزتنا التجريبية عند القيام بقياساتنا. على سبيل المثال يجب التأكّد من أن الجهد الكهربائي في السلك الواصل إلى الكاشف لا يتغيّر بشكل كبيرٍ بحيث يكفي لإبطال نتائج القياس بين الساعتين 12 ظهراً و6 مساءً، عندما يعود الناس في الجوار إلى منازلهم بعد العمل ليشغّلوا مكيّفاتِهم الهوائية أو أفرانَهم ذات الأمواج المكروية عند تحضيرهم للعشاء أو غيرها من الأشياء (علينا أن نتذكّر أنّ شركة الأوج قد خُدعت بالتراوحات في مقياس الـ g الناجمة عن اختبار صفارات الإنذار عن الغارات الجوية في المدن المجاورة، فنحن لا نرغب في أن يتم خداعنا بمثل هذه الأمور عندما نُجري تجاربَنا).



الشكل 5: يمكن إدارة زجاجة خمر - لا لصاقة عليها - حول محور تناظرها بأيّ زاويةٍ نريد - أي بشكل «مستمر» - من دون أن يطرأ أيّ تغيّر على مظهرها أو على خواصّها الفيزيائية. توجد طريقةٌ بديلةٌ عن ذلك بأن ندور نحن حول الزجاجة، وهنا أيضاً لا تغيير يطرأ على مظهرها ولا على خواصّها الفيزيائية.

تدور الأرض في المكان بين الساعتين 12 ظهراً و6 مساءً بزاوية تسعين درجة. يدور المخبر - بسبب خطّ العرض الواقع فيه - بزاويةٍ أصغر من ذلك (إذا كان المخبر واقعاً على خطّ العرض الموافق لخمس وأربعين درجة إلى الشمال من خطّ الاستواء، فإن زاوية دوران

المخبر في المكان ستبلغ ستين درجة لا غير بين منتصف النهار والساعة 6 مساءً(*). حيث إن المخبر **يدور** - ولو بزاوية أصغر من الزاوية القائمة - فإننا نستطيع إذاً المقارنةَ بين معطياتنا التجريبية لنرى ما إذا كان سلوك ميزونات الـ K مختلفاً في الظهيرة عنه في الساعة 6 مساءً أو لا. يمثّل هذا التحقّق بالطبع اختباراً للاستقلالية عن الزمن بالإضافة للاستقلالية عن الاتّجاه. ولكنْ بما أننا نحصل على النتيجة نفسها تماماً في التوقيتَين المختلفَين، فإنه من المرجّح عدمِ وجودِ أثرٍ للاعتماد على الزمن أو للاعتماد على الاتجاه إن النقطة الرئيسة في هذا التحليل هي أنّ سلوك ميزونات الـ K حيادية الشحنة لا يعتمد بأي شكلٍ من الأشكال على كيفية اتّجاهها في المكان ولا على طريقة توجيه الجهاز الذي يقيسها، مما يدلّ على أنّ قوانين الفيزياء متناظرة دورانياً.

ومن جديد نقول إنه يتوجب على التوصيف الرياضياتي للمقدار الفيزيائي اللامتغيّر دورانياً أن يكون نفسه متناظراً. وكمثالٍ بسيطٍ على ذلك لنأخذ بعين الاعتبار طولَ مؤشّرة قاعة الصف. نفترض أن المؤشّرة مُمدَّدة على المنضدة، وأنّ مقبضها مثبَتٌ في نقطة معيّنة، بينما يقع رأس قمتها في نقطة أخرى من المنضدة. بما أنّ سطح المنضدة ثنائي الأبعاد فعلينا استعمال منظومة إحداثيات ثنائية البعد. إذا كان رأس قمّة المؤشّرة في الموقع (x,y)، واخترنا أن يقع المقبض في نقطة المبدأ (0,0) (يمكننا في الواقع استخدام اللاتغيّر الانسحابي لنضع المقبض في مبدأ الإحداثيات)، فإنّ الصيغة التي تعطي طول المؤشّرة L - استناداً إلى نظرية فيثاغورس - هي: $L^2 = x^2 + y^2$

(*) أي الزاوية بين الشاقول (العمود على سطح الأرض) في منتصف النهار وبينه في الساعة 6 مساءً.

(«مربّع الوتر يساوي مجموع مربّعي الضلعين القائمين»، هل قالت الفزّاعة ذلك لساحر الـ Oz[*]؟).

لنفترض الآن أننا أدرنا المؤشّرة بزاوية q اخترناها كيفياً مع إبقائنا المقبض ثابتاً في مكانه. يصبح موقع رأس قمة المؤشّرة الآن (x',y') بينما يبقى المقبض في النقطة (0,0). يمكننا باستعمال قليلٍ من علم المثلثات أن نعبّر عن الإحداثيات الجديدة (التي عليها فتحة) بدلالة الإحداثيات القديمة (التي لا تحتوي على فتحة). من الواضح أن رأس القمّة سيقع على محيط دائرة نصف قطرها L ومركزها المبدأ (0,0)، ونجد أن طول المؤشّرة بعد الدوران هو: $L^2 = x'^2 + y'^2$. لا تعتمد النتيجة على الزاوية q، لذا تكون صيغتنا (نظرية فيثاغورس) لطول المؤشّرة **لامتغيّرةً بالنسبة إلى الدورانات!** ويعني ذلك أن الصيغةَ نفسها لحساب الطول تظل صالحةً قبل الدوران وبعده، فهي لا تعتمد على زاوية الدوران وبالتالي فهي تتمتّع بالتناظر الدوراني[6].

(*) ساحر أرض الأوز (The Wizard of Oz): قصة أطفالٍ كتبها فرانك باوم (Baum) وتمّ تحويلها لاحقاً في عام 1939 إلى فيلم شهير. تدور أحداث القصة عن مغامرات فتاة اسمها دوروثي (Dorothy) في أرض الأوز الخاضعة لحكم الساحر الذي يحاول إبقاءَ سلطته المطلقة على هذه الأرض. يتساءل الساحر في أحد المشاهد عمّا إذا كان لأيّ من الحاضرين دماغٌ يعمل، ثم يمنح شهادة دكتوراه للفزّاعة التي ذكرتْ خطأً نظرية فيثاغورس إذ قالت: مجموع الجذرَين التربيعيَّين لطولَي ضلعين في مثلث متساوي الساقين يساوي الجذر التربيعي لقاعدته! ومع ذلك ابتهجت بالشهادة، وظنّت أنه صار لديها دماغٌ ذكي.

(6) يمكننا باستخدام علم المثلّثات أن نكتب صيغةً لـ (x',y') بدلالة (x,y) وزاوية الدوران θ، فنحصل على: $x' = x\cos(\theta) + \sin(\theta)$ و $y' = -x\sin(\theta) + y\cos(\theta)$. بتعويض هاتين الصيغتَين في $L = \sqrt{x'^2 + y'^2}$ نحصل على $L = \sqrt{x^2 + y^2}$. وهكذا تعطينا الصيغ الرياضياتية نفسَ النتيجة لطول المؤشّرة **بعد** إجراء الدوران، وهذا يعني أنّ الرياضيات التي استعملناها تتضمّن تناظراً دورانياً.

تناظر الحركة

اكتشف مختبر الغيدانكن تناظراً آخر وأكثر عمقاً للمكان والزمان: **لا تعتمد نتيجة قياس الوسائط الفيزيائية الأساسية على الحالة الحركية للمخبر، عندما يكون متحركاً حركة منتظمة في المكان مهما كانت سرعته.** عندما لا تكون حركة المخبر منتظمةً بسرعة ثابتة، فإنه يتسارع أو يتباطأ أو يدور، وتظهر فيه حينئذٍ بشكلٍ ظاهري قوى غريبة و**خيالية زائفة** مثل **قوة النبذ المركزي** (سنرى لاحقاً أن قوة النبذ هذه ليست في الحقيقة قوةً، بل بالأحرى هي تعبيرٌ عن مل أيّ شيءٍ للاستمرار في حركةٍ ثابتة السرعة على خطّ مستقيم). وهكذا اقتصرت إدارة المختبر في تصريحها على «الحركة المنتظمة»، أي الحركة المستقيمة بسرعة ثابتة لا تتغيّر. لم يكن اقتصارُها هذا في حقيقة الأمر ضرورياً، ولكنه جعل إدارةَ الحسابات وضبطَها مهمةً أسهل. بشكلٍ عامّ يُدعى التصريح المذكور أعلاه بـ**مبدأ النسبية**، وهو مرتبطٌ بوجود شيءٍ سنتعرّض له قريباً (يُدعى باسم **العطالة**) يشكّل الأساس الذي تقوم عليه نظرية إينشتاين في النسبية الخاصة.

لكنّ الحركات ليست جميعها منتظمة بالطبع، ففي أحد الأيام اقترب مختبر الغيدانكن بشكل خطير من ثقب أسود هائل الكتلة (انظر الشكل 6). وقد تعطّلت محرّكات المختبر، فبدأ بالسقوط الحرّ نحو الثقب الأسود. في البداية لم يلاحظ أحدٌ في المختبر أيّ آثارٍ للثقب الأسود بسبب عدم وجود قوى ثقالية أو قوى نبذ مركزي عند السقوط الحرّ، وبالتالي كان كلّ الأشخاص عديمي الوزن تماماً. لقد شعر الجميع كما لو كانوا عائمين في الفضاء الفارغ، وكما لو لم يكن هناك ثقبٌ أسود بالقرب منهم وعلى وشك ابتلاعهم[7]. هذا هو

(7) لا ننصحك بمحاولة إجراء هذه التجربة في منزلك. في الحقيقة إذا تعرَّض امرؤٌ -=

سبب القدرة على محاكاة حالة انعدام الوزن في طائرةٍ لا تعلو كثيراً عن سطح الأرض، إذ يمكن للطائرة أن تتبعَ مساراً يوافق سقوطَها الحرّ، ولن يشعر روّاد الفضاء المتمرّنون داخل الطائرة بأيّ أثرٍ للثقالة.

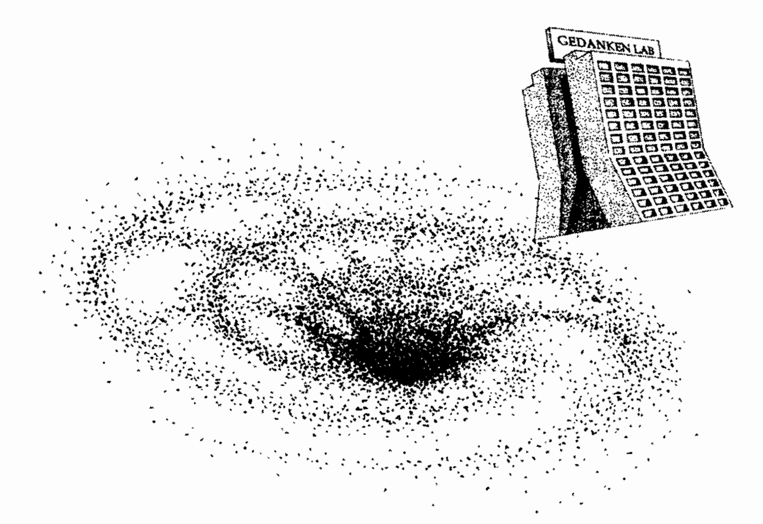
أعطت التجارب في مختبر الغيدانكن ـ أثناء سقوطه الحرّ باتجاه الثقب الأسود ـ النتيجةَ نفسَها لقيم الوسائط الأساسية في الطبيعة، فكانت مطابقةً لما كانت عليه عندما كان المختبر يتحرّك حركة مستقيمةً منتظمة بعيداً في الفضاء الخاوي. لحسن الحظ نظر أحدهم أخيراً من النافذة، ولاحظ أنهم على بُعد دقائق فقط من أفق الحادثة للثقب الأسود التي لو تجاوزوها فلن يستطيعوا العودة منها أبداً. تمكّن الروّاد من تشغيل محرّكات النفث الاحتياطية المخصصة للطوارئ، وبالكاد نجح مختبر الغيدانكن في الإفلات بجلده.

أثناء فترة الهرب المثير وتشغيل محركّات الطوارئ، تحرّك مختبر الغيدانكن بعيداً عن الثقب الأسود بتسارع قدره 3g، بحيث شعر كلّ شخص داخله كما لو كان وزنه أثقل بثلاث مرّات من وزنه

= وهو في مركبة فضائية ـ إلى تأثير ثقبٍ أسود، فإنّ مركز الثقل (الكتلة) للمنظومة الصلبة ـ أي للمركبة ـ يكون في حالة سقوط حرّ، بينما لا تكون كذلك أطرافُها الحدّية؛ لأنها مرتبطةٌ بشكل صلب وقاسٍ مع مركز الثقل (الكتلة)، وبالتالي لا يمكن أن تكون هذه الأطراف الحدّية نفسها في حالة سقوط حرّ. يؤدّي ذلك إلى خلق إجهادٍ يُدعى بالقوة المدّ ـ جزريّة، تصبح قيمتها هائلةً بالقرب من أفق حدث الثقب الأسود بحيث تؤدّي إلى تمزيق وتحطيم الشخص تعيس الحظّ الساقط فيه إلى قطع عديدة. لا يكون هذا الأثرُ كبيراً في حالة أغلب المنظومات الثقالية مثل الشمس أو القمر أو الأرض، وذلك لأنّ شدّة الثقالة لا تتغيّر كثيراً على طول امتداد المركبة الفضائية. ورغم ذلك فنحن نلاحظ بالتأكيد آثار قوةٍ مدّ ـ جزريّة على الأرض التي يكون مركز كتلتها في حالة «سقوط حر» (يحوم في مداره) حول مركز ثقل (كتلة) منظومة «الأرض ـ القمر»، ففي تلك الحالة لا يكون سطح البحر في حالة سقوط حرّ؛ مما يجعله يتحرك ويسيل تحت تأثير القوّة المدّ ـ جزريّة، وهذه القوى قد تكون كذلك ذات دور سببي في حدوث ظواهرَ أخرى مثل الهزّات الأرضية والزلازل.

الاعتيادي على الأرض (شعورٌ أسوأ بكثير ممّا تشعر به بُعَيد عشاءٍ دسم في عيد الشكر (Thanksgiving)). ومع ذلك ظلّت جميع التجارِب ـ خلال فترة التسارع بعيداً عن الثقب الأسود ـ تعطي القيمَ نفسها للوسائط الأساسية في الفيزياء (بالرغم من بعض الأعطاب التقنية الناجمة عن انفكاك بعض الأسلاك أو عن عدم تثبيت بعض الأجهزة الذي أدّى لسقوطها وتحطّمها على الأرضية).

إنّ حقيقةَ بقاءِ قوانين الفيزياء في حالة السقوط الحرّ ضمن حقل ثقالي مطابقةً لها في حالة الحركة المنتظمة بغياب الثقالة هي دعمٌ قوي وعميق لفكرة تناظر الحركة، وهذا التناظر يشكّل أساس نظرية إينشتاين في النسبية العامة. وهكذا فإنّ قوانين الفيزياء يمكن صياغتها بطريقة مستقلة عن حركة المراقِب، وهذا تناظرٌ عميق للحركة: **إننا لا نشعر بالثقالة إلاّ عندما لا نكون في حالة سقوط حرّ**، فمفهوم التسارع يرتبط ارتباطاً وثيقاً إذاً بالشعور بالثقالة.



الشكل 6: يظهر مختبر الغيدانكن عندما اقترب من الثقب الأسود المُسمّى تارتاروس (أو الجحيم ـ هاديس)، وكاد يسقط فيه.

لتبسيط الأمور يتمّ التركيز على الحالة السهلة للحركة المنتظمة (ذات السرعة الثابتة). تمثّل الحركة المنتظمة بدورها تناظراً مستمراً لقوانين الفيزياء، لأننا يمكن أن نتحرّك بأيّ قيمةٍ نختارها للسرعة، إذ إننا نستطيع تغيير السرعة إلى سرعةٍ أخرى (عبر التسارع) بشكلٍ مستمر مع ملاحظة بقاء نفس القوانين الفيزيائية صالحة. إنّ هذا **التغيّر في السرعة لمنظومةٍ ما** ـ إذا ما نُظر إليه كتناظرٍ ـ هو الذي يمثّل التحويل أو العملية التناظرية التي تبقى قوانين الفيزياء خلالها ثابتةً لا تتغيّر. وكحال مصطلح **الدوران** الذي يوافق العملية التناظرية التي تغيّر من الاتّجاه، فإننا ندعو التغيير في الحالة الحركية لمنظومة ما بالـ**مُعزِّز** (Boost). وهكذا تكون قوانين الفيزياء لا متغيّرةً بالنسبة إلى المعزِّزات التي سنرى لاحقاً أنه يمكن النظر إليها كـ «دورانات» في الأبعاد الأربعة للزمان والمكان. يَبرز هذا الوصف للحركة في النسبية الخاصة لإينشتاين حيث يكون تناظر الحركة توسيعاً لمفهوم التناظر الدوراني في المكان.

بالرغم من أنّ صمودَ الفيزياء وعدمَ تغيّرها بالنسبة إلى المعزِّزات ـ الذي يُدعى بمبدأ النسبية ـ نربطه عادةً مع إينشتاين، فإنّ الفكرة بدأت في الواقع مع غاليليو الذي كان أول من أدرك مفهوم العطالة أي مل الأشياء للتحرّك في حركةٍ منتظمة ما لم نؤثّر عليها بقوة ما. لقد مثّل ذلك الأمر القفزةَ المفاهيمية الأكبر في تاريخ فهم الإنسان للطبيعة، وكان بحقّ نقطة البداية لعلم الفيزياء. وتمّ لاحقاً صقلُ مفهومي النسبية والعطالة مع إينشتاين الذي ساقته إلى ذلك خصائصُ الضوء والكهرمغناطيسية اللافتة للنظر. من الممكن القول ـ وبشكل موثوق ـ إنّ مفهوم النسبية ومفهوم العطالة الذي يكافئه يشكّلان حجر الزاوية لمجمل الفيزياء، وسوف نتعرّض لهذين المفهومين بتفصيلٍ أكبر في الفصل السادس.

«الشمولي» إزاء «الموضعي»

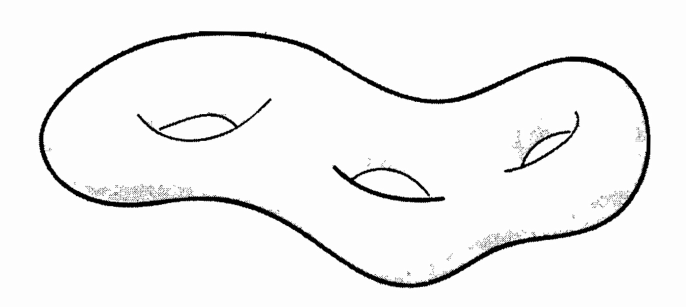
هناك سؤال دقيق وحذق يطلّ بوجهه دوماً في أثناء مناقشتنا: هل التناظرات عند المسافات والأزمنة الأصغر هي نفسها كما عند المسافات والأزمنة الأكبر؟ ألا يمكن لقوانين الفيزياء ألاّ تبدو ثابتةً لا تتغيّر إلاّ عندما نتفحّصها عبر فتراتٍ زمنيةٍ طويلة جداً مثل عمر الكون؟ ألا يمكن لها أن تتغيّر بسرعة عبر مقاييس زمنية فائقة القصر مثل الزمن الذي يستغرقه الضوء لاجتياز قطر النواة الذرية أو البروتون أو حتى مقاييس زمنية أصغر من ذلك بكثير؟ أوَ لا يمكن أن توجدَ تناظراتٌ عند المسافات فائقة الصِغَر وعند الفترات الزمنية مفرطة القِصَر غير ظاهرة ولا جليّة في الكون بمقاييسه الكبيرة؟ هذه أسئلةٌ جيدةٌ حقاً.

تُدعى الأسئلة التي تعنى بشكل الكون وبنيته عند الـ «الفترات الزمنية الطويلة» أو عند الـ «المسافات الكبيرة» بالأسئلة **الشمولية**. تتعرّض هذه الأسئلة لـ**توزّع المادة** في الكون وسبب حدوثه، وهي تمثّل نوع الأسئلة التي يطرحها عادةً العامل في الكونيات. هل الكون مستوٍ مثل رقعةِ شطرنجٍ غير محدودة تمتد إلى اللانهاية في جميع الاتجاهات؟ أم أنه غير محدود في بعدٍ واحد بينما من المُحتمَل أن يكون محدوداً ودائري الشكل في بعدٍ آخر، بحيث يبدو شكل الكون الشمولي كما لو كان أنبوباً ضخماً أو اسطوانة؟ أم أنّ الكون يشبه في شكله سطحَ طابةٍ ـ كرة عملاقة؟ أم أنّ شكله كسطح كعكة بالغة الضخامة (أو ما يُدعى بـ **الطارة** (torus)، انظر الشكل 7).

تعنى الأسئلة الشمولية بتاريخ الكون وتطوّره وكذلك بالذي خلقه وأنتجه مهما كانت طبيعته. كيف أتى الكون إلى الوجود؟ ما الذي حدّد حجمَه وشكلَه؟ كيف سيستمرّ في المستقبل؟ وهناك ارتباطٌ وثيقٌ بين هذه الأسئلة الشمولية وبين الأسئلة الأخرى المتعلّقة

بالمسافات فائقة الصغر في الكون. ومن حيث المبدأ يمكن الإجابة عن الأسئلة الشمولية، ولكنّ ذلك في الواقع العملي مهمة صعبةٌ للغاية.

يركّز فيزيائيو الجسيمات ـ في الناحية الأخرى ـ على الكائنات الأصغر في الطبيعة وعلى المسافات الأقصر في المكان. يحاول هؤلاء العلماء إجراء قياسات **موضعية** للعالَم، فيدرسونه كما هو في الفناء الخلفي لمنازلهم. ترتبط البنية **الموضعية** للمكان (والزمان) بهذه الأسئلة. ما هي التناظرات عند المسافات الأصغر في المكان والزمان؟ ما هي المكوّنات الأساسية للمادة؟ ما هي القوى الأساسية التي تتأثر المادة من خلالها؟ تعنى هذه الأسئلة بدراسة نسيجِ البنية الداخلية للمكان والزمان مع الصمغ واللوازم التي تجعله متماسكاً بمجمله، وكذلك بدراسة القوانين الأساسية في الطبيعة.



الشكل 7: يمكن لفضاءٍ ثنائي الأبعاد أن يكون بهيئة **سطحٍ** لكعكةٍ متعدّدة القبضات. إنّ **الفيزياء الموضعية** متماثلة هنا معها عند أي نقطةٍ من سطح كرة، أما الفيزياء الشمولية فتتميّز في هذه الحالة عنها في حالة الكرة من خلال طوبولوجيا الكعكة المجوّفة ذات العدد المنتهي من الثقوب.

يمكن فهم الاختلافات بين المظاهر والخواص الموضعية والشمولية للكون بدلالة فقاعة صابونٍ كبيرة من النوع الذي ينفخه الأطفال. تُصنع فقاعات الصابون الكبيرة من خلال غمس عروةٍ معدنية في دلوٍ يحتوي على صابونٍ سائل، ثم القيام بنفخ الهواء من خلال العروة لتشكيل فقاعةٍ كبيرة وجميلة. تتشكّل العروة بقوام رقيقٍ متموج وشفافٍ مع مسحةٍ من ألوان قوس قزح. تهتزّ الفقاعةَ قليلاً قبل أن تركن أخيراً لتعتمدَ شكلاً (شمولياً) لكرة. تتألّف الفقاعة على مسافاتٍ صغيرة (موضعياً) من «مادة دبقة ولزجة» هي الصابون، أمّا على مسافاتٍ كبيرة فإننا ندخل عالَم الفيزياء الشمولية.

تعنى الأسئلة الشمولية عن الفقاعة بحجم وشكلِ الكون الإجمالي لفقاعة الصابون وبخصائص تموّجاته، كَأن تسألَ ما هو الحجم الأعظمي الذي يمكننا تشكيله بواسطة النفخ؟ أما الأسئلة (الموضعية) عن المسافات الصغيرة فتعنى بتركيب الصابون نفسه، كأن تسأل ما هو الصابون وممّ يتألّف؟ وما هو سبب كونه شفّافاً ولزجاً بحيث يسمح بتكوين فقاعات كبيرة؟ من الواضح أنّ الأسئلة الموضعية ذات صلةٍ وثيقة جداً بإمكانية وجود فقاعة الصابون وبخصائصها. على سبيل المثال، إذا خفّفنا الصابون ومدّدناه بكثيرٍ من الماء فإن الفقاعات الناجمة ستغدو أصغر فأصغر، أمّا إذا كان الماء قليلاً جداً فلن تتشّكل الفقاعة أبداً. تُخبرنا معرفة حجم الكون الإجمالي لفقاعة الصابون بمعلومةٍ عن الصابون نفسه، أمّا البنية التفصيلية للصابون ـ عند المسافات الأقصر ـ فتقوم على تسمياتٍ ومصطلحاتٍ تقنية مزخرفة مثل: تشكّل الجزيئاتُ مادةَ سطحيةً ـ فعّالةً من شوارد سالبة الشحنة، تركيبها الرئيسي هو أملاح قلوية (صوديومية وبوتاسيومية) لحموضٍ غليسيرولية

ثلاثية(*) (شحوم ثلاثية الحموض الدسمة). هذا فرعٌ علميٌ معقّد ومثير للاهتمام قائم في حدّ ذاته.

نلِج عند المسافات الصغيرة عالَماً لأسئلةٍ من نوع جديد ومختلف، يمكننا فيه أن نسأل عن تنظيم جزيئات الصابون وعن كيفية تشكيلها وإمكانية تغييرها. يجلب فهمُ قوانينِ التركيب الجزيئي للصابون معه فوائدَ جمّة، فمن خلالها يمكننا صناعة أنواع جديدة من الصابون قادرة على تنظيف أيّ شيء! ويمكننا اختراعُ صابونٍ قابلٍ للتفتّت حيوياً فلا يسببّ تلوّثاً ويمكن استخدامه لتنظيف بقع هائلة من النفط المتسرّب من ناقلات النفط والعائم قرب الشواطئ، أو تركيب أنواعٍ مبتكرة من الصابون كمادة أجودَ تستخدم للتزييت والتشحيم. ماذا عن صمغ صابوني أو وقودِ آلةٍ صابوني أو صابونٍ مغناطيسي أو صابونٍ بتقنيةِ التكنولوجيا النانوية(**) قادرٍ على تنظيف نفسه بعد انسكابه؟

إنّ القوانين الموضعية للطبيعة هي أمرٌ أساسيٌ وجوهريٌ يحكم كلّ الظواهر، فهي التي تحدّد في النهاية ما يمكن وجوده أم لا. إنّ الكون الشمولي في نهاية الأمر ليس إلاّ واحداً من الأدوات أو الاختراعات أو **التطبيقات** العديدة التي يمكن تحقيقها ابتداءً من فهمٍ تفصيلي للقوانين الموضعية للطبيعة.

بالإضافة إلى تناظرات الزمكان التي ناقشناها هنا، هناك تناظرات

(*) مجموعة دهون يتألّف جزيئُها من جزيء غليسيرول وثلاثة جزيئات من حموض دسمة.

(**) الموضوع الرئيس في هذا الحقل العلمي الجديد هو كيفية التحكّم بالمادة عند المقاييس الذرّيّة والجزيئية، وهو يتعامل عادةً مع بنى من رتبة 100 نانومتر أو أصغر، ويعنى بابتكار وتطوير أدواتٍ وأجهزةٍ مناسبة أبعادها من الرتبة السابقة.

مستمرة أخرى لا تنطبق على الزمان والمكان، بل هي تناظرات للمادة ولخصائصها الذاتية التي يصفها ميكانيك الكم ولخصائص الجسيمات الأولية التي تكوِّنها. كلا المظهرين الموضعي والشمولي لهذه التناظرات عميقٌ في حدّ ذاته. تقودنا هذه التناظرات إلى مفهوم **الشحنة** وإلى القوى الأساسية في الطبيعة. سوف نصف هذا في الفصول اللاحقة، ولكن لننتقل الآن إلى مقتضيات التناظرات المستمرة للمكان والزمان ونتائجها على سلوك المنظومات الفيزيائية كما تشرحها نظرية إيمي نوثر.

الفصل الخامس
نظرية نوثر

من أجل كلّ تناظر مستمر في الطبيعة، لابدّ من وجود قانون مصونية موافق.
من أجل أيّ قانون مصونية، لابدّ من وجود تناظر مستمرّ موافق
نظرية نوثر

قوانين المصونية في الفيزياء الابتدائية

تُعتبَر نظرية نوثر الرابطةَ المباشرة والأكثر عمقاً بين الديناميك - أي القوى والحركة والقوانين الأساسية في الطبيعة - وبين عالَم التناظر المجرّد. تمَّ برهان النظرية سنة 1915 على يد الشابة إيمي نوثر بُعَيد التحاقها بجامعة غوتنغن.

تزوّدنا النظرية برابطٍ بين التناظر المستمر للقوانين الفيزيائية وبين وجود قانون مصونية موافق. إنّ قانون المصونية هو تصريحٌ عن وجود مقدارٍ فيزيائي قابلٍ للقياس (مثل الطاقة الكلية لمنظومة فيزيائية) **لا يتغيّر** خلال مجمل العمليات الفيزيائية (مثال: تبقى الطاقة الكلية نفسها قبل وبعد حدوث أيّ عملية فيزيائية). يُدعى مثل هذا المقدار الفيزيائي بـ**المقدار المصون (الكمية المحفوظة)**. توحّد نظرية نوثر بين

مفاهيم التناظر وبين قوانين المصونية، وتقدر بذلك على إخبارنا كيف تتجلى التناظرات بشكلٍ مباشر في الطبيعة.

سنركّز هنا على **قوانين المصونية للزمكان**. تنجم قوانينُ المصونيةِ الخاصةُ هذه عن التناظرات الانسحابية والدورانية في المكان والزمان التي وصفناها في الفصل السابق، وهي تقود إلى قوانين مصونية **الطاقة والاندفاع (كمية الحركة) والاندفاع الزاوي (عزم كمية الحركة)**. تُدرَّس هذه المفاهيمُ عادةً في دروس الفيزياء للمرحلة الثانوية، حيث يتمّ التركيزُ على الدلائل والإثباتات التجريبية على انحفاظها. مع ذلك لا تُذكَر - لسوء الحظّ - في هذه الصفوف أبداً الصلةُ العميقة التي تربط هذه المفاهيم مع تناظرات الزمكان من خلال نظرية نوثر إلاّ في ما ندر. هذا بالرغم من أنّ قوانين المصونية تصبح أسهلَ على الفهم مع ذكر تلك الصلة، لأنّ «لغزَها» يصبح مكشوفاً عندما يُنظَر إليها كنتيجة آتية من التناظر.

سنورد - في مناقشاتنا الحالية - نظريةَ نوثر كحقيقةٍ نقبلها من دون عرض برهانٍ رياضياتي عليها (وسنرى كيف يتمّ تطبيقها مع تقدّمنا في المناقشة). يمكن تطبيق نظرية نوثر في جميع مجالات الفيزياء، فهي تصلح لكلا الفيزياء التقليدية (سواء أتضمّنت النسبية الخاصة أم لا) وميكانيك الكمّ، إلاّ أنه في الحالة الأخيرة يجب التدقيق على مفهوم «المقدار الملحوظ» وإعادة النظر فيه[1]. في الواقع

---

(1) يرتبط مفهوم الكمية المحفوظة (المصونة) بوجود **تيارٍ محفوظ (مصون)**. وكمثال عمّا نقصده بالتيار المصون سنأخذ بعين الاعتبار جريان وسيلان الشحنات الكهربائية في منظومةٍ ما، ويسهل فهم ذلك من خلال تصوّر علبة خيالية يمكن أن تكون أيَّ جزء من الأجزاء المكوّنة للدارة كمكثّفة ما أو مقاومة أو غيرها. إنّ الشحنة الكهربائية لا يتمّ خلقها ولا تتمّ إزالتها في أيّ نقطةٍ محلّيّة من الدارة الكهربائية - وهذا يعني أنّ الشحنة الكهربائية مصونة - ولكنْ يمكن للشحنات الكهربائية أن تجري وتسيل **من وإلى** النقاط المختلفة من الدارة، وعلينا وضع هذا بالحسبان عند التحدّث عن مصونية الشحنة الكهربائية. وهكذا نصل إلى الخلاصة =

نحن نجد ـ إلى جانب قوانين المصونية المتعلّقة بالزمكان التي سنناقشها هنا ـ العديدَ من قوانين المصونية الأخرى في الفيزياء، مثل انحفاظ الشحنة الكهربائية؛ أو انحفاظ العدد الإجمالي **للباريونات** (عدد البروتونات والنترونات منقوصاً منه عدد البروتونات المضادة والنترونات المضادة) في منظومةٍ ما؛ أو انحفاظ العدد الكلي للّبتونات كالإلكترونات ونترينواتها؛ أو انحفاظ **اللون الكواركي** (الشحنة اللونية) لحالةٍ ما تتضمّن كواركات وغليّونات كحالة البروتون؛ وهكذا دواليك. ينجم أيٌّ من هذه المقادير المصونة ـ الشحنة الكهربائية والعدد الباريوني والعدد الإلكتروني والشحنة اللونية وغيرها ـ من وجود تناظرٍ مستمر مختبئ في أعماق بنية قوانين الطبيعة. في الحقيقة ـ كما نوّهنا به سابقاً وكما سنرى لاحقاً ـ إنّ قوانين الفيزياء في حدّ ذاتها **تُعرَّف أساساً بواسطة مبادئ تناظرية.**

مصونية الاندفاع (انحفاظ كمية الحركة)

كما رأينا سابقاً يُعتبَر عدم تغيّر قوانين الفيزياء بالنسبة إلى إجراء الانسحابات في المكان حقيقةً تجريبيةً نلحظها في الطبيعة. هذه جملةٌ قوية في المعاني، لأنها تدلّ على وجود تناظر مستمر في قوانين الفيزياء. في الواقع تكافئ فرضيتُنا عن عدم تغيّر المكان بالنسبة إلى الانسحابات المستمرّة تصريحَنا بأن **أيّ نقطة** في الفضاء ـ من وجهة نظر قوانين الفيزياء ـ مكافئة لـ **أيّ نقطةٍ أخرى** فيه.

يعني التناظر هنا أنّ أيّ انسحابٍ مكاني نجريه على منظومة فيزيائية أو على جهازٍ ما وبأي مقدارٍ كان وفي أيّ اتّجاه ـ وهذا

= الآتية: «إنّ المعدّل الزمني لتغيّر الشحنة الكهربائية في أيّ علبة خيالية موضعية مساوٍ لتدفّق التيّار إلى داخل هذه العلبة الخيالية أو إلى خارجها». تمثّل هذه الإفادةُ إعادةً لصياغة بيان قانون المصونية. في الحقيقة تنجم مصونيةُ الشحنة الكهربائية عن تناظر عميق وأساسي في الكهرمغناطيسية، ويتمّ كلّ ذلك وفق ما تقتضيه نظريةُ نوثر.

مكافئ لإجرائِنا انسحاباً على منظومة الإحداثيات المستخدَمة لوصف الأشياء - لن يغيّر من قوانين الطبيعة التي تحكم هذه المنظومة. لذلك لن تتأثّر نتيجةُ أيّ تجربةٍ نجريها إذا ما أجرينا انسحاباً على كامل المخبر ونقلناه إلى مكانٍ آخر في الفضاء. وباختصار نقول إنّ قوانين الفيزياء والمعادلات التي تعبّر عنها صامدة ولامتغيّرة بالنسبة إلى الانسحابات المكانية.

تؤدي نظريةُ إيمي نوثر - في هذه الحالة الخاصة لعدم تغيّر القوانين الفيزيائية عند إجراء العمليات المستمرّة للانسحاب المكاني - إلى قانونِ **مصونية الاندفاع** (أو **انحفاظ كمية الحركة**)! نحن نتعلّم في المرحلة الثانوية أنّ **الاندفاع الكلي** لمنظومة معزولة يبقى ثابتاً خلال الزمن بغضّ النظر عن تفاعل الجسيمات داخل المنظومة في ما بينها، فعلى سبيل المثال عندما تصطدم كرتا بلياردو مع بعضهما، فإنّ الاندفاع الكلي قبل الاصطدام (حادثة الصدم) يساوي تماماً الاندفاعَ الكلي بعد الاصطدام (حادثة الصدم). لكننا الآن نرى سبباً أكثر أساسيةً لهذه الظاهرة، وهو أنّ قوانين الطبيعة هي نفسها في جميع أرجاء المكان! لذلك دعنا نذكّر أنفسنا قليلاً بمفهوم الاندفاع (أو كمية الحركة).

وفقاً لنظرية نوثر، في المكان الثلاثي الأبعاد الذي نعيش فيه يمكننا أن نسحب وننقل منظومةً فيزيائية وفق **ثلاثة اتجاهات عمودية** (يدعوها العلماء بثلاثة **انتقالات متعامدة في ما بينها مثنى مثنى**). حيث إنه يمكن سحب المنظومة وفقاً لأيّ من هذه الاتجاهات، لابدّ إذاً من وجود ثلاثة اندفاعات مصونة، **كلّ واحد منها يوافق اتجاهاً من اتجاهات المكان.** هناك تقابل بين مجموعة المقادير المصونة وبين **درجات الحرية** للانسحابات المتعامدة في المكان. من أجل هذا كله - وكما هو الحال بالنسبة إلى موضع الجسيم أو سرعته أو القوة المؤثّرة عليه - يكون للاندفاع **طويلة واتجاه في**

المكان. وهذه الأشياء ندعوها عموماً بـ**الأشعة**[2].

السرعةُ ـ على سبيل المثال ـ شعاع، وهي تعبّر عن قياسٍ لحركةِ أيّ كائن، وبالتالي فلها اتجاهٌ هو **اتجاه حركة** الكائن وطويلةٌ (سعةٌ أو شدّةٌ) هي **قيمة سرعته.** إذاً ـ من ناحية تقنية ـ قيمةُ السرعة مقدارٌ عددي لا غير، فهي لا تحدّد أيّ اتجاه؛ إذ أستطيع القول بأنّ قيمة سرعتي تبلغ ستين ميلاً في الساعة من دون إخبارِكَ إلى أيّ نقطة في البوصلة أتوجّه. لتحديد شعاع السرعة عليّ إخبارُكَ ـ إضافةً لقيمة سرعتي ـ باتجاه حركتي، فأقول مثلاً: «أنا أسير بسرعة ستين ميلاً في الساعة نحو الشمال»[3].

---

(2) تظهر خرائط التنبؤ بالطقس مثالاً شائعاً عن استخدام الأشعة، إذ تبيّن غالباً سرعاتِ الرياح في مواضع متنوّعة على الخارطة، حيث يُشار إلى هذه السرعات بأشعة صغيرة تُدعى «لحى الريح». تُصمَّم خرائطُ الطقس تلك عادةً وفق قيم الارتفاع عن سطح البحر ـ كأن يُقال «خارطة موافقة للارتفاع 18000 قدم» ـ أو وفق الضغوط الجوية ـ كأن يُقال «خارطة موافقة للضغط 500 ميلليبار» ـ (هذان النوعان من الخرائط متماثلان غالباً، ولا يختلفان إلاّ في حالةِ تحرّكِ منظوماتِ ضغطٍ عالٍ أو منخفضٍ إلى داخل المنطقة المدروسة). يُشار إلى سرعة الرياح في موضعٍ ما عادةً برسم قطعةٍ مستقيمة موصولة إلى دائرة مفتوحة تشير إلى الاتجاه الذي تهبّ الريح منه، ويكون على القطعة علاماتٌ تدلّ على سرعة الريح مقدّرةً بواحدة الـ 10 عقدات («علامات لحى» طويلة) أو الـ 5 عقدات («علامات لحى» قصيرة)؛ حيث 1 عقدة = 1 مل بحري في الساعة = 1,15 مل في الساعة. إذا احتوت الدائرة على علم مثلّثي الشكل، فإننا نضيف 50 عقدة إلى قيمة الشعاع. يُعَدّ كلّ هذا نوعاً من التنويعات المعتمدة على التمثيل الرمزي للأشعة، فالمفهوم يبقى نفسه متجلّياً في قطعةٍ مستقيمة ذاتِ سهمٍ يشير إلى جهة الريح وطويلةٍ تمثّل قيمةَ سرعتها.

(3) من المستحيل التكلّم بطريقة ذات معنى عن الفيزياء دون إدخال مفهوم الشعاع. يُرمَز عادةً للأشعة برموز فوقها إشارة السهم مثل $\vec{v}$ أو $\vec{u}$ أو $\vec{p}$ أو $\vec{p_1}$، وهكذا. عندما نأخذ منظومة إحداثيات ما، فإننا نقول إنّ للشعاع مركّبات هي مساقطه على كلٍّ من محاور الإحداثيات الثلاثة؛ نكتب على سبيل المثال: $\vec{p_1} = (p_x, p_y, p_z)$ حيث كل مركّبة هي مسقط الشعاع على محور الإحداثيات الموافق. يمكن أن نجمع الأشعة أو نطرحها من بعض، ويمكن كذلك أن نضربها بالأعداد المألوفة فنزيد أو ننقص سعاتها (طويلاتها). إنّ الاندفاع الكلّي لمنظومةٍ ما هو مجموع كلّ الاندفاعات المنفردة لجميع مكوّناتها. نعبّر عن ذلك غالباً بشكل معادلة: $\vec{p} = \vec{p_1} + \vec{p_2} + \vec{p_3} + ...$، حيث $\vec{p}$ هو الاندفاع الكلّي للمنظومة و$\vec{p_1}, \vec{p_2}, \vec{p_3} =$

تخطيطياً نمثّل غالباً أيَّ شعاع برسم سهم يشير رأسُه إلى اتجاه الشعاع ويتحدَّد طولُه وفق طويلة (سَعة) الَشعاعَ، فمن أجل الكائنات بطيئة الحركة مثل السلحفاة، نرسم إذاً الشعاعَ كسهم يشير إلى اتجاه حركة السلحفاة؛ ويكون طول هذا السهم قصيراً يعكسُ سرعة السلحفاة البطيئة. أمّا من أجل الأرنب البري، فنرسم كذلك سهماً باتجاه حركة الأرنب، ولكنّ طوله سيكون أكبر بسبب كون الأرنب أسرع.

الاندفاع في الفيزياء النيوتنية هو حاصل جداء **كتلة** الجسم (عدد له طويلة لكن لا اتجاه له) بشعاع **السرعة**. للاندفاع إذاً اتجاه هو اتجاه الحركة كما يعيّنه اتجاه شعاع السرعة، وله كذلك طويلةٌ (سعةٌ) مساوية لجداء الكتلة بقيمة سرعة الجسم. وهكذا يكون الاندفاع ـ كما يجب له أن يكون ـ شعاعاً. نكتب إذاً المعادلة التالية للتعبير عن الاندفاع: $P=m\vec{v}$ حيث m هي الكتلة و $\vec{v}$ شعاع السرعة. لنتذكّر أن الكتلة m تعبّر عن قياسٍ لكمية المادة التي يحتويها الجسم، ولكنْ لا دلالة لها على حركته. شعاع السرعة $\vec{v}$ بالمقابل هو قياسٌ لحركة الجسم من دون أيّ دلالة على كتلته. يعبّر الاندفاع إذاً عن قياسٍ لكمية الحركة الفيزيائية التي تحتوي على كلتا الكتلة والسرعة معاً. يمكن لاندفاعِ كائنٍ ثقيلٍ جداً يتحرّك ببطء أن يساوي اندفاعَ كائن صغيرٍ جداً يتحرّك بسرعة. وفي مثالنا عن السلحفاة والأرنب، بالرغم من أن قيمة سرعة الأرنب أكبر من قيمة سرعة السلحفاة إلاّ أن اندفاع الأخيرة قد يكون مماثلاً لاندفاع الأولى في حال كانت كتلتها أكبر بكثير.

= وغيرها هي اندفاعات الأجزاء المنفردة المكوّنة للمنظومة. تقول نظريةُ نوثر إنّ $\vec{p}$ مصون، بينما يمكن أن تتغيّر الاندفاعات المنفردة $\vec{p_i}$ خلال إجرائية ما. علاوة على ذلك تصلح العبارة $P=m\vec{v}$ من أجل كائنٍ نقطيٍّ تقريباً وله كتلة (مع فرض أنه يتحرّك بسرعة صغيرة مقارنةً مع سرعة الضوء)، فالاندفاع هو مجرّد حاصل جداء كتلة الكائن بسرعته. إنّ الاتجاهات الموجودة في المكان ـ والتي يمكن سحب (نقل) المنظومات الفيزيائية وفقاً لها هي أشعّة، لذلك إذا ما تذكّر الطالبُ نظريةَ نوثر فهو لن ينسى أنّ الاندفاعَ مقدارٌ شعاعي عند اجتيازه لامتحان الـ **SAT**!

لنؤكّد هنا أنّ الاندفاع **الكلي** لمنظومة فيزيائية هو ما يبقى مصوناً، وليست الاندفاعات المنفردة لأجزاء المنظومة. هذا صحيحٌ لأنه عندما نجري انسحاباً في المكان فإننا ننقل **مجمل المنظومة** وليس جزءاً واحداً فقط من أجزائها.

يحدث المثال الأبسطُ عن مصونية الاندفاع عند التحلّل (الانحلال) الإشعاعي لجسيم A إلى شظيّتَين أو إلى «جسيمين ـ ابنتين» B وC. إذا كان الجسيمَ الأصلي ساكناً في المخبر (أي سرعته مساوية للصفر) في البدء، فإنّ الاندفاع الابتدائي لـ «المنظومة» مساوٍ للصفر. بعد حصول التحلّل (الانحلال) والتفكّك يتحرّك الجسيمان B وC باتجاهين متعاكسين تماماً (نَصِف ذلك بالقول ظَهراً ـ لِظَهر). بسبب مصونية الاندفاع، يجب أن يكون مجموع اندفاعَي الجسيمَين ـ الابنتين مساوياً للصفر أي $\vec{P}_B = \vec{P}_C$. هذه النتيجة ذات فائدة جمّة وحاسمة عند تناول حالاتٍ أكثر تعقيداً، كأن يتمّ التحلّلُ (الانحلالُ) إلى ثلاثة جسيمات. في الحقيقة يتفكّك النترون ـ وهو أحد مكوّنات النواة الذرية ـ إلى ثلاثة جسيمات $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$ هي بروتون وإلكترون ونترينو (مضادّ)[4]. لكلٍّ من هذه الجسيمات الثلاثة المنطلقة للخارج اندفاعُها الخاصّ بها $\vec{P}_p$ و$\vec{P}_e$ و$\vec{P}_{\bar{\nu}}$، وهنا أيضاً يجب أن يكون مجموع هذه الاندفاعات الثلاثة مساوياً للصفر.

إذا تفكّك نترون ساكنٌ في المخبر، فإنه من السهل كشف كلا البروتون والإلكترون الصادرَين وتقفّي أثرهما من خلال كاشِف

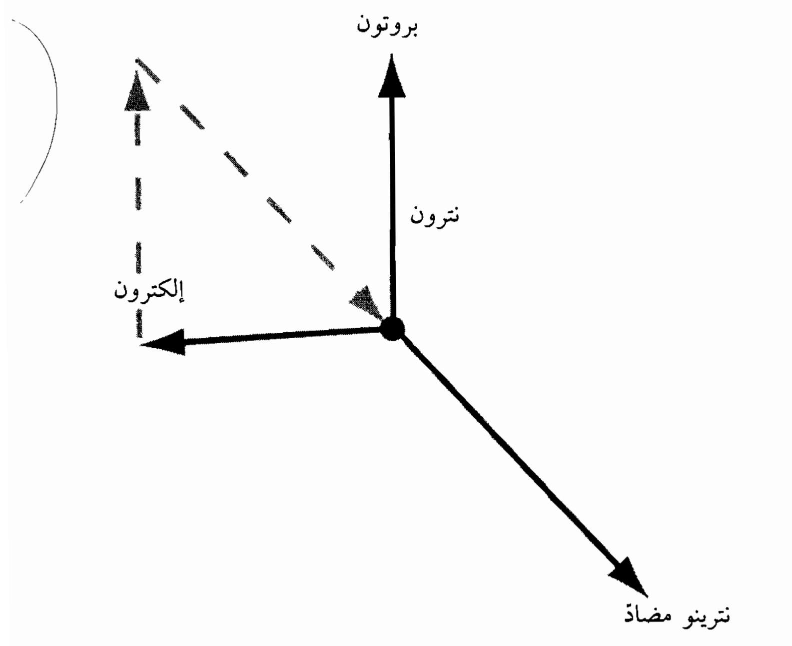
(4) سيلاحظ القرّاء أنّ هذه الإجرائية مماثلة ـ وإن كان ذلك بتغيير بسيط ـ للإجرائية $p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \bar{\nu}_e$ المسؤولة عن تحطيم النجوم الجبابرة والتسبّب بانفجارات السوبرنوفا. إنّ «عَصْرَ» البروتون والإلكترون وضغطهما معاً لا يمكن حصوله إلاّ عندما تكون الكثافات كبيرةً جداً داخل النجوم الثقيلة الآخذة بالتحطّم والانسحاق. أمّا النترون في الفضاء الحرّ فهو يتحلّل إلى بروتون وإلكترون ونترينو (مضادّ) بعمر نصف حياة يساوي تقريباً إحدى عشرة دقيقة من خلال إجرائية «تحلّل بيتا»، $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$.

الجسيمات. بالمقابل من الصعوبة **بمكان** كشف النترينو، لكنْ إذا ما لاحظنا أنّ اتجاهَي حركتَي البروتون والإلكترون يصنعان زاويةً ما لا توافق تماماً وضع الظَّهر للظَّهر (أي زاوية مختلفة عن 180 درجة)، فإنّ قانون مصونية الاندفاع يدفعنا إلى استنتاج وجود جسيم ثالث ـ هو النترينو (المضاد) ـ تتضمَّنه الإجرائية (انظر الشكل 8). وهكذا نكون قد اكتشفنا النترينو بطريقة غير مباشرة بواسطة قانون مصونية الاندفاع. ولقد كان هذا في الواقع الدليلَ التجريبي الأول على وجود النترينوات.

هناك مثالٌ آخر مألوف عن مصونية الاندفاع، هو حادثة اصطدام جسمَين ثقيلَين نقطيَّين كأن يكونا كرتَي بلياردو. نرمز للجسمَين بـ 1 و2 ولكتلتيهما ولسرعتَيهما بـِ m_1 و m_2، و$\vec{v}_1$ و$\vec{v}_2$ على الترتيب. وعلى سبيل المثال، يمكن للجسم 1 أن يكون الكرةَ ذات الرقم 1 على طاولة البلياردو وللجسم 2 أن يكون الكرة ذات الرقم 2. لنفترض الآن أنّ الكرتين اصطدمتا مع بعضهما، فيكون الاندفاع الكلّي الابتدائي مساوياً لـ $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$، بينما بعد الاصطدام تتغيّر السرعتان عادةً لتصبحا $\vec{v}_1$ و$\vec{v}_2$ بسبب القوى وديناميك الصدم، أمّا الكتل فلا تتغيّر (كثيراً): على الأقلّ في حالة كرات البلياردو. يصبح الاندفاع النهائي بعد الاصطدام (حادثة الصدم) إذاً مساوياً لـ $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$، ويخبرنا قانون مصونية الاندفاع عندها بأنه لدينا $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$.

في الحقيقة إنّ حادثةَ اصطدام (صدم) كرتي البلياردو ـ عندما يتمّ وصفها على المستوى الذري ـ هي ظاهرة شديدة التعقيد تتضمّن تفاعلاتٍ بين تريليوناتٍ وتريليونات من الذرات. تحدث خلال حادثة الصدم إعادة ترتيبٍ خفيفة للمادة نفسها، حيث تُقتلَع بعض الذرات لتغدوَ غباراً بينما يتم كَبْس وعَصْر ذرات أخرى معاً. يسبّب ذلك اهتزازاً في الترتيب المحدّد لمواضع ذرّات المادة، ممّا يُصدر صوتَ «الطقطقة» مع اصطدام الكرتين. وعندها تعود البنيةُ الفيزيائية الذرية

لكلتا كرتي البلياردو بمجملها إلى الوراء، وتبدآن بالفتل والتدويم متدحرجتَين باتجاهَين مختلفَين. إنّ بقاء كتلتي الكرتين بعد الصدم قريبتَين ممّا كانتا قبلَه يُعَدُّ تقريباً ممتازاً، ولكنه ليس من الضرورة أن يكون صحيحاً دوماً، فالأجسام المادية يمكنها أن تغيّر من كتلها في أثناء عملية الصدم، كما يحصل غالباً عندما تتصادم الجسيمات الأولية وتتحوّل إلى جسيماتٍ أولية مختلفة.



الشكل 8: يتفكّك نترون اندفاعه الابتدائي معدوم إلى بروتون وإلكترون ونترينو (مضاد). رُسمت أشعة الاندفاع الثلاثة للجسيمات الصادرة بخطوطٍ غير متقطّعة. يساوي مجموعُ هذه الأشعة الثلاثة الصفرَ، ويعني ذلك (تخطيطياً) أنه لو قدّر لشخص أن يسير على طول أحد هذه الأشعة ـ وليكن ذاك المتعلّق بالإلكترون ـ إلى نهايته، ثم يستدير ليكملَ سيرَه موازياً لشعاعٍ ثانٍ ـ مثل شعاع البروتون (خط متقطّع) ـ إلى نهايته، ثم يستدير ليسير بموازاة الثالث ـ شعاع النترينو المضاد (خط متقطّع) ـ فسوف يجد عند نهايته أنه قد عاد إلى نقطة المبدأ.

من أجل هذا كلّه نقول إنّ الاندفاع الكلي ـ على مستوىً مجهري تفصيلي للغاية ـ يساوي مجموعَ الاندفاعات المنفردة لجميع الذرات في كلا كرتَي البلياردو عند لحظةٍ ابتدائيةٍ من الزمان. ومع ذلك فإنّ وصفَنا المبسّط للنموذج «ثنائي الأجسام» في حالة اصطدام كرتَي بلياردو ـ وحيث الاندفاع الكلي هو $m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$ لا غير ـ هو وصفٌ تقريبيٌ ممتازٌ جداً. في الحقيقة لا نستطيع التقدّم في علم الفيزياء إذا لم نعتمد مثل هذه التقريبات لأوضاع معقّدة جداً يستحيل تحليلها في غياب التقريبات. وفي نهاية الأمر يتمثّل قسمٌ كبيرٌ من فنّ علم الفيزياء في معرفة أيّ من التقريبات يجب اعتماده. وهكذا فعلى الرغم من أنّ الاندفاع الكلي هو ما يجب انحفاظه في أثناء الصدم، فإنه يمكن اعتبار الاندفاع المصون في حالة كرتي البلياردو هو مجموع شعاعَي اندفاعَي كرتي البلياردو قبل وبعد الاصطدام ضمن تقريبٍ ممتاز.

متى يغدو مثل هذا التقريب سيئاً؟ لنتصوَّر أنّ الجسم 1 هو كوكب الأرض وأنّ الجسم 2 هو كويكب ضخم اسمه سلطان (Zlot) له حجم مماثل لحجم القمر. يمكن تكوينُ فكرةٍ عمّا سيحدث في هذه الحالة، إذا تخيّلنا الآثارَ المرعبة على الحياة في الأرض ـ لو حدث اصطدام الأخيرة بالكويكب سلطان ـ والظواهرَ المعقّدة الناجمة عن ذلك. لا يحتاج سلطانُ والأرض في واقع الأمر لأن يتماسّا كي يُحدثا الكارثة، لأنه يمكنهما أن يقتربا من بعضهما ثم «يلمس» أحدهما الآخر من خلال قوة الثقالة حتى لو بقيت المسافة الحقيقية الفاصلة بينهما تعادل آلاف الأميال، فهذا التآثر سيبقى غير مسرّ البتة، بل مميتاً لجميع قاطني كوكب الأرض (أو كويكب سلطان)، حيث ستبرز جبالٌ ضخمة وتحدث ارتفاعات مدّية هائلة وتجتاح موجات صدمية جيولوجية كامل

أرجاء الأرض مغيِّرةً مجمل سطحها ومعيدةً تشكيله. سوف تنجم أمواجٌ مائية وترابية يبلغ ارتفاعها مئات الأميال، وسيتحطّم الكوكبان إلى ملياراتٍ من القطع! ورغم أنّ الحطام بغالبيته سوف ينتهي بالاندماج والإدغام ضمن الأرض وسلطان اللذين سيُعاد تشكيلهما وترتيبهما، فإنّ قسماً كبيراً منه سيطير إلى الفضاء ليتجمّع من جديد مكوّناً نيازكَ وكويكباتٍ جديدةً وصغيرةً سيسقط كثيرٌ منها على العالَمين حديثَي التشكّل، وسوف يستمر ذلك لقرونٍ من الزمن.

إنّ المجموعة الكاملة للإجرائيات الفيزيائية ـ التي تنجم عن مثل هذا الاصطدام غير الوارد ـ معقّدة جداً، إلاّ أنّ قانون مصونية الاندفاع يضمن لنا بقاءَ **الاندفاع الكلي** للجملة الفيزيائية الإجمالية المؤلّفة من الأرض وسلطان هو نفسه قبل الصدم وبعده. من أجل الأرض وسلطان يكون الاندفاع الكلي الابتدائي مساوياً لـ: $m_{Earth}\,\vec{v}_{Earth} + m_{Zlot}\,\vec{v}_{Zlot}$، أما الاندفاع النهائي الكلي فيساوي... $m_1\,\vec{v}_1 + m_2\,\vec{v}_2 + m_3\,\vec{v}_3 +$ حيث جمعنا كلّ الاندفاعات في الحطام الناتج آخذين بعين الاعتبار مختلف الكتل والسرعات لأجزائه وشذراته وقطعه العديدة. بالرغم من هذه الفجيعة الفادحة التي سيزول معها أيّ شيء مألوف لنا من على وجه البسيطة، ستبقى حقيقةٌ واحدة: $m_{Earth}\,\vec{v}_{Earth} + m_{Zlot}\,\vec{v}_{Zlot} = m_1\,\vec{v}_1 + m_2\,\vec{v}_2 + m_3\,\vec{v}_3 + \ldots$ وهي أنّ الاندفاع الكلي في أثناء الصدم يبقى مصوناً! قد لا يكون ذلك شيئاً يُذكَر أمام الفاجعة، ولكنه على الأقل شيءٌ نتمسّك به[5].

(5) إنّ أحدّ الأمور الجديرة بالانتباه هو أنّ الأرض قد أُصيبت في وقتٍ ما بضربةٍ صادمةٍ من قبل كويكب ثقيلٍ جداً، وكان هذا هو سبب نشوء منظومة الأرض ـ القمر. ستظلّ دوماً تفاصيلُ هذه النظرية ـ التي تتنبّأ بشكلٍ دقيقٍ نوعاً ما بمدى التوفّر النسبي لأشياءٍ مثل =

تختزل مصونيةُ الاندفاع مجملَ تعقيدات الظاهرة الفيزيائية، فتبقى صحيحة مهما بلغت درجة التعقيد ومهما كانت طبيعة القوى المتضمَّنة. مثال آخر هو انفجار قذيفة المدفع في الهواء، حيث تتطاير آلاف الشظايا الانفجار، كلاً منها تحمل كمية الحركة (الاندفاع) الخاصة بها، ولكن المحصلة الكلية لكل الاندفاعات تساوي تماماً الاندفاع الابتدائي للقذيفة نفسها. مصونية الاندفاع هي قيد صارم على ما يمكن أو لا يمكن حصوله في إجرائية فيزيائية، مهما كانت درجة تعقيد هذه الإجرائية ومهما كانت طبيعة القوى الداخلة في هذه الإجرائية قد يُطرَح السؤال التالي: «ألا يتغيّر اندفاع كوكب الأرض دوماً وبالتالي فهو **ليس** مصوناً؟» في الواقع: نعم؛ فالأرض تدور في مدارٍ معيَّن حول الشمس، وبالتالي تتغيّر سرعتها باستمرار (يتغيّر شعاع السرعة مع تغيّر اتجاه الحركة حتى لو بقيت شدتها ثابتة). مع ذلك يجب على **الاندفاع الكلي** أن يبقى مصوناً خلال هذه العملية، فعلينا الآن توسيع تعريف «المنظومة» (الجملة المدروسة) بحيث يشمل الشمس أيضاً. تؤثّر الشمس على الأرض بقوة جرّ تجعلها تغيّر من سرعتها وبالتالي من اندفاعها، ولكنّ الأرض من ناحية أخرى تؤثّر بدورها على الشمس بقوة جذب تغيّر كذلك من

= الماء والحديد والسيليكون... إلخ - مبهمةً إلى حدّ بعيد في ظلّ غيابِ المعلومات التفصيلية عن المنظومة البدائية المؤلّفة من الأرض والكويكب. انظر مثلاً: W. Benz, A. Cameron and H. J. Melosh, «The Origin of the the Moon and Single Impact Hypothesis III,» *Icarus*, vol. 81 (1989), pp. 113-131; H. J. Melosh, «Giant Impacts and the Thermal State of the Early Earth,» in: H. Newsom and J. Jones, eds., *Origin of the Earth* (Oxford: Oxford University Press, 1990), pp. 69-83,

هناك أيضاً معلومات مفيدة في الموقع الإلكتروني (Origin of the Moon) لميلوش (Melosh): www.lpl.arizona.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 18 أيار/ مايو 2004).

سرعتها (وإن كان ذلك بمقدارٍ ضئيلٍ جداً)، فالكوكب الدائر في مداره يسبّب عادةً «تذبذبات وارتعاشات» في حركة الشمس[6].

في الحقيقة لقد تمّ حديثاً اكتشاف كواكب جديدة تدور حول نجوم بعيدة من خلال تقنية أُعطيت لقَبَ «مراقبة التذبذبات». اكتشف الفلكيون تذبذباتٍ في حركة بعض النجوم التي افتُرض أنّ لها كواكب فائقة الثقل مثل المشتري تدور حولها في مداراتٍ قريبة ممّا يجعل التذبذبات أعظمية. عُرف ما يزيد عن خمسين من هذه «الكواكب

(6) يمكننا فهمُ «التذبذبات والارتعاشات» عبر التفكير بالحركة المدارية كما لو كانت مؤلَّفةً من تفاعلات آنية عديدة، أي «اصطدامات ضعيفة» بين الأرض والشمس من خلال قوة الثقالة. يكون الاندفاع الكليّ الابتدائي مساوياً لـ: $m_{Earth}\,\vec{v}_{Earth} + m_{Sun}\,\vec{v}_{Sun}$، بينما يكون الاندفاع الكليّ النهائي $m_{Earth}\,\vec{v}'_{Earth} + m_{Sun}\,\vec{v}'_{Sun}$. تبقى كتلتا الأرض والشمس مصونتَين خلال هذه الاصطدامات (مع إهمال أثر القمر والمشتري والمرّيخ... إلخ)، أي $m_{Earth}\,\vec{v}_{Earth} + m_{Sun}\,\vec{v}_{Sun} = m_{Earth}\,\vec{v}'_{Earth} + m_{Sun}\,\vec{v}'_{Sun}$. وباعتبار أننا نعرف أنّ الأرض أخفّ بكثير من الشمس أي m_{Earth} / m_{Sun}، لذلك وباستخدام قليل من الحسابات نجد أنّ التغيّر في سرعة الشمس بعد «الاصطدام» هو:

$$\vec{v}'_{Sun} - \vec{v}_{Sun} = \left(\frac{m_{Earth}}{m_{Sun}}\right)\left(\vec{v}'_{Earth} - \vec{v}_{Earth}\right)$$

مما يعني أنّ التغيّر في سرعة الشمس متناسبٌ مع المقدار الصغير m_{Earth} / m_{Sun}، ويكون هذا العدد صغيراً جداً عندما نعوّض كتلتي الأرض والشمس بالقيم العددية لهما، إذ يساوي تقريباً $0{,}3\times10^{-6}$. وبذلك يكون أيّ تغيّر في سرعة الشمس ـ أو أيّ «تذبذب» في حركة الشمس ناجم عن دوران الأرض ـ غيرَ قابلٍ للإدراك تقريباً. إنّ كوكب المشتري أثقل بكثير منَ كوكب الأرض حيث $m_{Jupiter}/m_{Sun} \approx 10^{-3}$، ومن الواضح أنه قادر على إحداث تذبذبات أكثر في حركة الشمس، ولكنّ نصف قطر مدار المشتري أكبر وبالتالي فإنّ سرعته المدارية في المكان أصغر بكثير من سرعة الأرض، ممّا يُنقص الأثرَ السابق نوعاً ما إلى قيمةٍ أقلّ من 10^{-3}. يسمح هذا الأمر كذلك بتفسير عدم ارتداد الأرض بمقدار محسوس عندما تقفز إلى الأعلى وأنتَ على سطحها، فالأرض في الحقيقة ترتدّ إلى الوراء للحظة وجيزة من أجل الحفاظ على الاندفاع وتعاني بذلك تغيّراً طفيفاً في سرعتها، ولكنّ هذا التغيّر مساوٍ لحاصل قسمة كتلتكَ على كتلة الأرض مضروباً بسرعة قفزك، فهو بالتأكيد مقدار ضئيلٌ يقرب من الانعدام!

الخارجية» ـ أي الكواكب التي تقع خارج منظومتنا الشمسية ـ والعدد في تزايدٍ مستمر[7]. لم نكن نظنّ أبداً عندما كنا صغاراً أنه سيكون بمقدورنا اكتشاف كواكب تدور حول نجوم غير شمسنا!

لقد أدرك الفيزيائيون، في واقع الأمر، مصونيةَ الاندفاع قبل وقتٍ طويل من نظرية نوثر، فهذه المصونية مُرمَّزة ضمن قوانين نيوتن في الحركة، وربّما اكتشفها نيوتن نفسه. إذا طبّقنا قوة $\vec{F}$ (شعاع) على جسم كتلته m ولفترة زمنية t فإنه يمكن إثبات أنّ اندفاعَه سيتغيّر بمقدار $\vec{F}t$، ومن ثم ستتغيّر سرعته بمقدار $\vec{F}t / m$. ندعو $\vec{F}t$ **بـالدفع** الذي تزوده القوة للجسم، وهكذا نرى أن **الدفع يساوي التغيّرَ في الاندفاع**. يسمح ذلك بتبرير السمعة التي تتمتّع بها المركبة الفضائية **إنتربرايز** (المشروع) (Enterprise) في فلم الخيال العلمي **ستار تريك** (حرب النجوم) (Star Trek)، حيث زُوّدت بـ «محرّكات دفع».

---

(7) يستطيع الفلكيون معرفةَ ما إذا كان نجمٌ بعيدٌ يعاني من الذبذبة عن طريق استخدام أثر دوبلر (Doppler) للضوء الصادر عنه (أي الانزياح نحو الأحمر لِلَون المنابع الضوئية المبتعدة عنّا أو الانزياح نحو الأزرق في حالة اقترابها منّا). لقد ساهمت مراقبة التذبذبات في اكتشاف أوّل بضعة الكواكب الجديدة خارج منظومتنا الشمسية: بيغاسوس 51 (Pegasus 51)، وهو كوكبٌ كتلته مقاربة لكتلة المشتري، ونصف قطر مداره أصغر من نصف قطر مدار عطارد في حركته حول الشمس، ويبلغ دوره المداري 4,2 يوماً (للمقارنة يستغرق عطارد 88 يوماً ليدور حول الشمس). من أجل معلوماتٍ إضافية عن هذه الكواكب الموجودة خارج منظومتنا الشمسية انظر: «Wobble Watching Revisited, www.Starryskies.com

ومقالة اكتشاف عوالم أخرى: Laurence R. Doyle, «Detecting Other Worlds: The Wobble Method», www.space.com

ومقالة اكتشاف الفلكيين لمجموعة من الكواكب خارج منظومتنا الشمسية: Maya Weinstock, «Astronomers Discover Bundle of Extrasolar Planets,»

على الموقع: www.space.com/scienceas-tronomy

(جميع المواقع وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 18 أيار/ مايو 2004).

لقد أدرك نيوتن أن الجسم 1 عندما يصطدم بالجسم 2 فإنّ هناك قوة يؤثّر بها الجسم 1 على الجسم 2، ولندعُها بـ $\vec{F}_{12}$. وبشكل مماثل ستكون هناك **قوة رد فعل عكسية** يعود ويؤثّر بها الجسم 2 **على** الجسم 1، ولنرمز لها بـ $\vec{F}_{21}$. على سبيل المثال، عندما يضرب لاعب البيسبول أليكس رودريغيز (Alex Rodriguez) الكرة بعصاه الغليظة (مضربه)، فإنّ هناك قوة تؤثّر بها العصا على الكرة $\vec{F}_{12}$ وقوة عكسية من الكرة على العصا $\vec{F}_{21}$. يخبرنا قانون نيوتن الثالث في الحركة بأنّ هاتين القوتين يجب أن تتساويا في الشدة وتتعاكسا في الاتجاه: $\vec{F}_{12} =- \vec{F}_{21}$ ويجب أن نلاحظ أنّ هذه المعادلة **معادلة شعاعية**، لأنّ القوى مقادير شعاعيةٌ بالضرورة، مثلُها في ذلك مثل التسارع والسرعة والاندفاع. نرى إذاً أنّ التغيّر في اندفاع الكرة عندما تُضرب بالعصا مساوٍ للدفع $\vec{F}_{12}\,t$، حيث t يمثّل المجال الزمني الصغير الذي تستغرقه حادثة الصدم. وبشكلٍ مشابه يتغيّر اندفاع العصا بمقدار $\vec{F}_{21}\,t$ في أثناء الصدم، وهو مقدارٌ مساوٍ لـ $-\vec{F}_{12}\,t$ وفقاً لقانون نيوتن الثالث. من هنا يكون التغيّر الصافي في الاندفاع الكلي لجملة العصا مضافاً إليها كرة البيسبول مساوياً لـ $\vec{F}_{12}\,t + \vec{F}_{21}\,t = 0$. ويعني ذلك أنّ الاندفاع الكلي مصونٌ ـ كما يجب أن يكون ـ في حالة اصطدام كرات بلياردو أو غيرها من حالات الصدم.

بما أنّ الأجسام الكبيرة عبارة عن مجموعاتٍ لمكوّنات منفردة صغيرة وعديدة، وحيث إنه يمكننا، نوعاً ما، التفكير بمجمل التفاعلات على أنها قابلة للتحليل إلى عددٍ من التفاعلات ثنائية الأجسام، ينجم عن ذلك إذاً أنّ الاندفاع الكلي مصونٌ في المنظومات كلّها. وهكذا تنجم مصونية الاندفاعُ حقيقةً من قانون نيوتن الثالث، ولكن من أين يأتي هذا القانون؟ إنّ نظرية نوثر هي

التعبير الأكثر عمقاً عن مقولة كون الاندفاع الكلّي مصوناً **لأنّ** التفاعلات تتحدّد بواسطة قوانينَ لا تعتمد على موقع المكان من الفضاء الذي توجد فيه المنظومة قيد الدراسة! إذاً ينجم قانون نيوتن الثالث $\vec{F}_{12} = - \vec{F}_{21}$ نفسه من نظرية نوثر، وبالتالي من التناظر الانسحابي لقوانين الفيزياء! وهكذا نرى أنّ «قوانين الفيزياء» في حقيقتها هي والتناظر شيءٌ واحد.

يمكن أن نقلب الحجّة بالعكس، فنقول إنّ صلاحية قانون مصونية الاندفاع حقيقةٌ نلحظها في الطبيعة ونستطيع التحقّقَ منها في أيّ إجرائية فيزيائية في المخبر؛ وبالتالي تقتضي نظرية نوثر ـ بسبب ملاحظتنا تلك لانحفاظ الاندفاع في المخبر ـ وجوبَ تمتّع المكان بالتناظر الانسحابي. يمكننا الآن أن نختبر مصونية الاندفاع مباشرةً في حوادث صدم الجسيمات الأولية التي تحدث خلال فترات زمنية صغيرة جداً، فنتحقّق من صلاحية انحفاظ كمية الحركة دوماً فيها. يقتضي ذلك فعلياً أنه على مسافاتٍ قصيرة جداً ـ من مرتبة 1/100,000,000,000,000,000 إنش (10^{-19} متر) ـ يبقى التناظر الانسحابي للمكان صالحاً.

مصونية الطاقة

إنّ كونَ قوانين الفيزياء لا تتغيّر بالنسبة إلى الانسحابات عبر الزمن هو تناظر مستمر، فما هو قانون المصونية الموافق والناجم عن نظرية نوثر إذاً؟ إنه ـ كما سبق وذكرنا ـ قانون مصونية الطاقة. بما أنّ ثبات الطاقة الكلية لأيّ منظومة هو حقيقةٌ تمّ التحقق منها تجريبياً لدرجاتٍ عالية من الدقة (في التجارب المتضمِّنة لكرات البلياردو أو للمدارات الكوكبية أو للكواركات)، تخبرنا النظرية إذاً أنّ قوانين الطبيعة يجب أن تكون لامتغيّرةً بالنسبة إلى الانسحابات الزمنية.

وبالعكس تشير الظواهر من أمثال المفاعل الحجري النووي لأوكلو بقوة إلى صحة فرضية عدم تغيّر قوانين الفيزياء مع الزمن، وبالتالي تقتضي عندها نظرية نوثر وجوبَ مصونية طاقة أيّ منظومة فيزيائية. بسبب ذلك علينا ألاّ نستثمر أموالنا في أيٍّ من مشاريع المحرّكات دائمة الحركة أو الطاقة المجانية الآتية من لا شيء (كمشروع شركة الأوج الكهربائية).

كيف يمكن لثقتنا بالاستنتاجات العلمية أن تترسَّخ؟ وعلى سبيل المثال، ما مدى إقناع تماسك قانون مصونية الطاقة خلال مختلف الإجرائيات الفيزيائية المتنوّعة؟ لو وُجد صدعٌ واحد في درع مصونية الطاقة، لَتَحطَّم كاملُ البناء المنطقي للفيزياء من خلال العلاقة التي تربطه بالتناظر الأساسي للانسحاب الزمني في القوانين الفيزيائية عبر نظرية نوثر.

في عام 1898، أجرى بيار وماري كوري (Pierre & Marie Curie) ـ مع هنري بيكيريل (Henri Becquerel) ـ أولى الدراسات عن الإشعاع الطبيعي الصادر من المواد. لم تكن البنيةُ الذريةُ ـ وبشكلٍ خاص النواة الذرية ـ معروفةً في ذلك الوقت. لاحظ هؤلاء العلماء الأشكالَ الأساسية للإشعاع الطبيعي الذي يصدر نموذجياً من النوى الذرية غير المستقرة، ويأخذ ثلاثة أشكال مختلفة تمّ تصنيفها إلى إشعاعات **ألفا** و**بيتا** و**غاما**.

ندركُ اليوم أنّ **أشعة ألفا** ما هي إلاّ إصدارٌ لنوى هليوم كاملة (جسيمات ألفا) عبر التحلّل (الانحلال) التلقائي لنوى أثقل بكثير. أمّا **أشعة بيتا** فهي إصدارٌ لإلكترونات عادية (أو مضاداتها «البوزيترونات») عند التحلّل (الانحلال) النووي، بينما **أشعة غاما** هي عبارة عن فوتونات (جسيمات الضوء أي «كمّات الكهرمغناطيسية») بطاقةٍ كبيرة تصدر أيضاً عن النوى غير المستقرة. من خلال الدراسة التفصيلية

لهذه «الإشعاعات» تمّ التحقّق من جميع القوانين الاعتيادية في الفيزياء ـ مثل مصونية الطاقة والاندفاع ـ في حالة إشعاع ألفا وإشعاع غاما؛ أما في الحالة الخاصة لإشعاع بيتا فقد اكتشف الفيزيائيون نتيجةً مقلقة للغاية: يبدو أنه عندما تقوم النواة في الذرة بإصدار أشعة بيتا (أو ما يُعرف كذلك باسم **انحلال أو تحلّل بيتا**)، فإنه يتمّ ظاهرياً **انتهاك** مصونية الطاقة (والاندفاع)!

أبسطُ مثالٍ عن تحلّل بيتا يحدث مع **نترون** منفرد ـ وهو أحد الجسيمات الموجودة في النواة الذرية ـ عندما يكون عائماً وحده في الفضاء ويتفكّك ظاهرياً إلى مجرَّد بروتون وإلكترون. تمثّلت المشكلة في أنّ عدداً لا يُحصى من المراقبات بيَّن أنّ مجموعَ طاقتَي البروتون والإلكترون هو دوماً أصغر من طاقة النترون الأصلية. كذلك كان حاصل جمع اندفاعَي الإلكترون والبروتون لا يساوي اندفاعَ النترون، لأنّ النترونات الساكنة في المختبر شوهدت تتفكّك إلى بروتونات وإلكترونات صادرة بغير وضعية الظَّهر للظهر، فيبدو أنّ هناك **مقداراً ضائعاً** من الطاقة والاندفاع عند تحلّل (انحلال) النترون. يمكن اعتبارُ مجملِ تحلّلات بيتا للنوى على أنّها في جوهرها تنويعاتٍ أكثرَ تعقيداً للإجرائية المذكورة أعلاه مع كون النترون مقيّداً فيها بشكل نموذجي ضمن النواة.

بقي هذا المقدار الضائع للطاقة والاندفاع في تحلّل (انحلال) بيتا لغزاً كبيراً بالنسبة إلى الفيزيائيين لسنين عديدة. حاول نيلز بوهر (Niels Bohr) ـ أحد الآباء المؤسّسين لميكانيك الكمّ ـ تفسير هذه الظاهرة من خلال افتراضه أنّ مدى صلاحية مصونية الطاقة والاندفاع محدودٌ في عالَمنا، وأنّ عمليات تحلّل (انحلال) بيتا قد أظهرت ولأول مرة انتهاكاً صريحاً لقانون المصونية هذا. لقد رأى بوهر ـ وهو المفكّر البارع والمبدع ـ كيف تغيّر فهمنا التفصيلي لمفهومَي الطاقة

والاندفاع بواسطة قواعد ميكانيك الكمّ في الربع الأول من القرن العشرين، فظنّ أنّ هذه الظاهرة قد تكون دلالةً على وجود تغييرات أعمق ومفاجآتٍ أكبر آتية إلى الفيزياء.

مع ذلك، كان اقتراحٌ كهذا سيقضّ بنتائجه مضاجع الفيزيائيين، فعبر نظرية نوثر كان سيقتضي أنه خلال تفاعل تحلّل (انحلال) بيتا وبطريقةٍ ما لن تكون التناظرات الموافقة لعدم التغيّر بالنسبة إلى الانسحابات المستمرة في المكان والزمان صحيحةً. وعوضاً عن اللاتغيّر هذا، كان المرء سيستطيع تخيّل بنية المكان والزمان كنوعٍ من شبكة بلورية لا تصحّ فيها التناظرات الانسحابية المستمرة في المكان (والزمان). وكان ذلك سيمثّل اكتشافاً مذهلاً حقاً حيث يصبح كوننا أشبه برقعة شطرنج متقطّعة لانهائية. لو أمكن لقانون مصونية الطاقة أن يُنتهَك لَما كنّا سنعتبر في نهاية الأمر الفكرةَ التي روّجت لها شركة الأوج فكرةً شاذة أو مستحيلةَ التحقيق.

لم يتقبَّل وولفغانغ باولي (Wolfgang Pauli) الفيزيائيُّ النظريُّ الشابّ والغضّ فكرةَ بوهر، فقد اختُبرت صلاحية مبدأي مصونية الطاقة والاندفاع وثبتت صحتهما بنجاحٍ في جميع مجالات الفيزياء المعروفة لغاية ذلك الوقت، وبدا من غير الطبيعي لباولي أن تظهر الانتهاكات في تفاعلات تحلّل (انحلال) بيتا **وحدها** ـ حيث يبدو أن آثارها كبيرة جداً ـ من دون غيرها من التفاعلات. إنّ كلّ الأشياء في الفيزياء مرتبطةٌ بعضها مع بعض على مستوى ما، لذلك ـ في حال صحّة هذه الانتهاكات ـ ما هو السبب في عدم وجود انتهاكاتٍ صغيرة للطاقة والاندفاع قابلة للكشف في مجمل العمليات الأخرى لاسيّما أنّ التناظرات التحتية للمكان والزمان تقتضي مصونيةَ الطاقة والاندفاع؟ ألا يجب أن يكون أحدُ هذه الانتهاكات لتناظرات الزمكان النفيسة شمولياً وعاماً تشعر به جميع القوى في الطبيعة وليس مجرَّد

ميّزة خاصة بتحلّل (انحلال) بيتا وحده؟ بدت كلّ تلك الانتهاكات لا معنى لها بالنسبة إلى باولي، لذا افترض باولي عام 1930 وجودَ جسيمٍ أولي جديد وغير ملحوظ، واقترح أنه يتمّ إصداره برفقة الإلكترون والبروتون في تفاعل تحلّل (انحلال) بيتا. لا يحمل هذا الجسيم الجديد أيّ شحنةٍ كهربائية، وبالتالي سيفلت من منطقة التحلّل من دون أن يتمّ كشفه البتة، لكنه سيحمل معه المقدارَ الضائع من الطاقة والاندفاع محافظاً بهذا على صلاحية قوانين المصونية. بعبارة أخرى يستطيع الفيزيائيون حساب مقدار الطاقة الضائعة ومقدار الاندفاع المفقود اللازمَين للحفاظ على قوانين المصونية في أيّ تفاعل تحلّل (انحلال) بيتا، وسيكون هذان المقداران مساويَين تماماً لما يتمتّع به الجسيم الجديد من طاقةٍ واندفاع. عبّر باولي عن ذلك في رسالةٍ بتاريخ 4 كانون الأول/ ديسمبر 1930 كتبها إجابةً لدعوةٍ إلى حضورِ مؤتمرٍ عن النشاط الإشعاعي:

سيداتي وسادتي الأعزّاء، الخبراء في النشاط الإشعاعي،

كما سيشرح لكم حامل هذه الرسالة ـ الذي أطلب منكم بكلّ سماحة أن تصغوا إلى التفاصيل التي سيذكرها ـ وبسبب الإحصاء «الخاطئ» لنوى الـ N والـ Li^6 والطيف المستمر لإشعاعات بيتا، فقد خطرت لي فكرةُ علاجٍ مستميتٍ من أجل إنقاذ... قانون مصونية الطاقة. أعني ـ بالتحديد ـ إمكانية وجود... جسيمات عديمة الشحنة الكهربائية سأدعوها بالـ [نترينوات] لها تدويم (سبين) مساوٍ لـ 1/2 وهي تخضع لمبدأ الاستبعاد... و[كتلها] في جميع الظروف لا يمكن أن تتجاوز 0,01 من كتل البروتونات. يمكن عندئذٍ تفسير وفهم الطبيعة المستمرة لطيف بيتا من خلال افتراضنا أنه في تحلّل (انحلال) بيتا يصدر [نترينو] بالإضافة إلى الإلكترون بحيث يبقى مجموع طاقتَي [النترينو] والإلكترون ثابتاً...

أوافقكم الرأي في أنّ علاجي هذا قد يبدو غير معقول، لأنّ مثل هذه [النترينوات] في حال وجودها كان يجب اكتشافُها قبل زمنٍ طويل، ولكن من يمتلك الجرأة هو وحده القادر على الفوز، والوضع الناجم عن البنية المستمرة لطيف بيتا صعبٌ، توضِّح مدى عسرته الملاحظةُ التالية التي ذكرها لي مؤخراً سلفي الصالح السيد دوباي (Debye) في بروكسيل: «أوه، من الأفضل بكثير عدمُ التفكير البتّة بهذا الوضع، مثله في ذلك مثل الضرائب الجديدة»، فمن الآن فصاعداً يجب مناقشة أيّ حلّ للمسألة، لذلك أيها الحضور الخبراء في النشاط الإشعاعي: انظروا واحكموا.
لسوء الحظ، لا يمكنني القدوم إلى توبينغن (Tübingen) شخصياً، لأنه عليّ التواجد هنا في زوريخ لحضور حفلةٍ مساءَ 6 ـ 7 كانون الأول/ ديسمبر. مع كلّ تحياتي لكم وللسيد باك (Back).
خادمكم المتواضع، و. باولي[8]

(لا يمكننا إلاّ أن نلاحظ أنه مهما قيل عن باولي فإنّ التزاماته وأولياته كانت راسخةً كالصخر لا يمكن تغييرها!)

يُدعى هذا الجسيم الآن باسم **النترينو**. عندما يتفكّك النترون في الفضاء الخالي فإنه يُصدر بروتوناً وإلكتروناً وبرفقتهما نترينو مضادّ. في لغتنا المعاصرة نقول إنّ الإلكترون يصدر مع نترينو ـ الإلكترون المضادّ. يساوي مجموعا الطاقات والاندفاعات النهائية تماماً الطاقة

---

(8) هذه الرسالة موجودة في أرشيف باولي في السيرن (CERN)، ويمكن زيارته إلكترونياً على: www.library.cern.ch (وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 1 حزيران/ يونيو 2004). نشكر لجنة أرشيف باولي في السيرن لسماحها لنا بإعادة إظهار الرسالة. إنّ كلمة **نترينو** (Neutrino) موجودة ضمن قوسَين متوسّطَين، لأنّ من أعطى ذلك الجسيمَ هذه التسميةَ كان في الحقيقة إنريكو فيرمي، بينما استعمل باولي تسمية **النترون** (Neutron) من أجل جسيمه الجديد، وهي تسميةٌ نستخدمها اليوم من أجل الجسيم الثقيل معتدل الشحنة الذي هو من مكوّنات النواة.

والاندفاعَ الابتدائيَّين للنترون ـ الوالِد. وجديرٌ بالملاحظة أنّ النترينو بشحنته الكهربائية المعدومة يسمح لتفاعل تحلّل (انحلال) بيتا أن يحقّق قانون مصونية **الشحنة الكهربائية.** تعني القيمةُ المعدومة لشحنة النترينو الكهربائية صعوبةَ كشفه ـ فهو لا يملك «مِقبَضَ» الشحنة الكهربائية الذي يسمح لنا بأن نمسكه بواسطته ضمن الحقول الكهرمغناطيسية في كواشف الجسيمات التي لدينا.

لقد كان باولي مصيباً! وتبيَّن أنّ النترينوات موجودةٌ فعلاً، إذ تمّ اكتشافها المباشَر أخيراً على يد كلايد كووان (Clyde Cowan) وفريدريك راينز (Fredrick Reines) سنة 1956، حيث كانت تَصدُر عن تفكّك النترونات الموجودة ضمن عمليات الانشطار النووي في قلب المفاعلات داخل محطات الطاقة النووية. وفي الوقت الحاضر نعرف أنّ هناك على الأقل ثلاثة أنواع ـ أو «نكهات» ـ مختلفة للنترينو. أثبت ليون ليديرمان (Leon Lederman) (وهو أحد مؤلّفَي هذا الكتاب) وملِ شفارتز (Mel Schwartz) وجاك شتاينبرغر (Jack Steinberger) في عام 1962 أنه يتمّ إنتاج النترينوات ضمن هويات متمايزة من خلال اكتشافهم لنترينو ـ الميون المختلف عن نترينو ـ الإلكترون. ونعرف اليوم أنّ هناك ثلاثة أنواع للنترينو: **نترينو ـ الإلكترون ونترينو ـ** الميون ونترينو ـ التاو. سندخل أكثر في تفاصيل هذه التسميات المعقّدة لعالَم الجسيمات في الفصول القادمة، فهذا العالَم غنيٌ بالتناظرات الصحيحة والتقريبية على حد سواء.

تتركّز الأبحاث اليوم على إجرائيات فيزيائية «تهتزّ» فيها الأنواع الثلاثة للنترينو، أي تغيّر فيها من هوياتها. على سبيل المثال، يمكن لنترينو ـ الميون الذي تمَّ خلقه خلال حوادث صدم ذات طاقات عالية أن يغيّر هويته إلى نترينو ـ التاو في وقتٍ لاحق. لَقد فتح باولي ـ من خلال إيمانه العميق بمصونية الطاقة والاندفاع ـ البابَ أمام عائلة

كاملة من الجسيمات الأولية: النترينوات. ولا يزال هذا البابُ حتى لحظة طباعة هذه الفقرة مفتوحاً على مصراعيه، فموضوع النترينوات هو واحدٌ من أهمّ موضوعات البحث العلمي وأكثرها شعبيةً، سواء في مجال فيزياء الجسيمات أم في مجال علم الكونيات. نضيف هنا أنّ الفيزيائيين التجريبيين لا يزالون في غالبية الأحيان يبحثون في كواشف صدم الجسيمات عن طاقة ضائعة أو اندفاع مفقود، فهذا الأمر في حال حصوله يتمّ تفسيره دوماً على أنه إشارةٌ لوجود جسيم جديد، وليس دليلاً على تحطّم قانونَي مصونية الطاقة والاندفاع. إنّ إيماننا ـ أو بالأحرى لنقُل ثقتنا (حيث إنّ العلم لا يُبنى على الإيمان ـ بتناظرات بنية المكان والزمان وبنظرية نوثر راسخٌ لا يمكن زعزعته، وذلك حتى اللحظة الحاضرة من تطوّر العلم.

يمكن للطاقة ـ كما رأينا سابقاً ـ أن تتجلّى بأشكالٍ مختلفة، وأحَد هذه الأشكال هو الطاقة الحركية ذات العلاقة بحركة الأجسام. تكمن صعوبة قياس الطاقة الكلية والتأكّد من مصونيتها عموماً في أن الطاقة الحركية ـ على سهولة كشفها عادةً ـ يمكن أن تتحوّل إلى أشكالٍ أخرى للطاقة تصعب ملاحظتها مثل الحرارة والصوت والطاقة الكامنة وطاقة التغضّنات وهلمّ جراً. الأكثر من ذلك ـ كما رأينا سابقاً أيضاً ـ هو إمكانية تحويل طاقة الحركة إلى طاقة كامنة والعكس بالعكس، ممّا يقود إلى إخفاء الآثار المباشرة والواضحة لمصونية الطاقة، ويجعلها تبدو مبهمةً نوعاً ما. عندما نترك عربةً للبضائع تسير على سكةٍ حديد أفقية المستوى يكون لها طاقةٌ حركيةٌ ما، ولكن بمجرّد أن يغدو المسار صاعداً إلى أعلى هضبة فسوف تتوقّف العربة بعد فترة من الزمن عن متابعة التقدّم، حيث تكون قد فقدت كامل طاقتها الحركية التي تحوّلت إلى طاقة كامنة موافقة لصعودها إلى الأعلى بعكس جرّ الثقالة. نقول هنا إنّ عربة البضائع قد «قامت

بعمل» مقاوم لقوة الثقالة، وفقدت طاقتَها الحركية التي غدت مخزَّنةً في الحقل الثّقالي. عندما تبدأ العربة بالتسارع في أثناء هبوطها التلّة، فإننا نقول إنَ الثقالة «تقوم بعملٍ» فتتخلّى عن طاقةٍ كامنة لتتحوّل إلى طاقةٍ حركيةٍ تُعاد بدورها إلى عربة البضائع. في النهاية وبعد إجراء كامل الحسابات تكون الطاقة الكلية للمنظومة الفيزيائية مصونةً.

مع ذلك يمكننا في بعض الحالات الخاصة ملاحظةُ حوادثَ صدم تكون فيها الطاقة **الحركية** الابتدائية (أي طاقة الحركة لا غير) والطاَقة **الحركية** النهائية متساويتَين، أي ملاحظةُ اصطداماتٍ تبقى فيها الطاقةُ الحركية نفسُها مصونةً. في مثل حوادث الصدم هذه، لا يجوز أن يكون هناك فقدانٌ للطاقة بتحوّلها إلى طاقةِ تشويهٍ أو حرارة أو صوت. تُدعى حالات الصدم الخاصة هذه باسم **حوادث صدم مرن.** يجب ألاّ يسبّب اللفظُ لَبْساً مع عصابات الشدّ المرنة الموجودَة مثلاً في الألبسة الداخلية الرجالية، فلفظ «**المرنة**» في الحالة الأخيرة يعني أنّ شكل الحزام وهيئته يبقيان نفسَيهما حتى بعد ارتدائه ليومٍ كامل.

هناك مثالٌ جميل عن صدمٍ مرنٍ بشكلٍ تقريبي جيّد هو ألعوبة مائدة القهوة المؤلّفة من كراتٍ صغيرة من الفولاذ معلَّقة بخيوط وقابلة للتصادم، حيث تُرفَع الكرة الواقعة في أحد الطرفين ثم تُترَك لتهبط وتصدم طابوراً من خمس كرات أخريات. عندها ترتفع الكرة التي على الطرف الآخر ثم تعود أدراجها لتهبط بدورها وتصدم الكرات الخمس باتجاهٍ معاكسٍ. يسبّب ذلك من جديد ارتفاعَ الكرة الأولى، وهكذا تتكرّر العمليةُ نفسها لزمنٍ طويلٍ شاهدةً بشكلٍ واقعي على المصونية شبه الكاملة للطاقة الحركية في حالات الصدم المرن. يميل اصطدام الفولاذ بالفولاذ إلى خلق صدمٍ مرنٍ بشكل جيد، لأنّ الفولاذَ ـ إلى حدٍّ ما ـ غيرُ قابل للانضغاط، وبالتالي لا ضياع للطاقة في التشويه وتغيير الشكل. هناك جزء ضئيل من الطاقة يضيع بشكل

صوت أو حرارة أو حركة للهواء، لذلك لابدّ أن تتوقّف الكرات في نهاية الأمر. إنّ مرونة الفولاذ على الفولاذ (أي الضياع البطيء للطاقة الحركية) هو أحد أسباب الفعالية الطاقية لقضبان سكة الحديد، فعربة البضائع ذات التزييت الجيّد يمكن أن تسير وحدها لأميالٍ عديدة على مسارٍ أفقي مُتقَن البناء، قبل أن يتسبّب الاحتكاك بضياع طاقتها الحركية ومن ثم توقّفها.

يجب أن نلاحظ أنّه بينما تكون الطاقة مصونةً، فإنّ الكتلة ليست بالضرورة كذلك. يسبّب هذا الأمر غالباً نوعاً من الإرباك للمبتدئين في مجال تعلّم الفيزياء، إذ يُقال لهم أيضاً إنّ الطاقة والكتلة متكافئتان من خلال معادلة إينشتاين الشهيرة: $E = mc^2$. في الحقيقة إنّ الصيغة الأخيرة غير صحيحة، لأنّ الجسيمات عديمة الكتلة ـ مثل الفوتونات ـ تمتلك طاقةً، كما أنّه يجب تغيير الصيغة السابقة في حالة حركة الجسيمات. لذلك يمكن لنواةٍ (أو جسيم أولي) أن تتحوّل إلى نواةٍ أخرى (أو جسيم آخر) بكتلةٍ مختلفة، بينما تبقى الطاقة الكلية في الإجرائية مصونةً (هناك عادةً جسيماتٌ أخرى تتضمّنها الإجرائية الفيزيائية من أجل حفظ الطاقة). [لا يتجلّى عدم تمتّع الكتلة بالمصونية واقعياً إلاّ في العمليات النووية التي تتضمن عادةً تفاعلات بين جسيمات أولية، بينما في العمليات غير النووية **تكون** الكتلة مصونةً بتقريبٍ ممتازٍ جداً]. تُعتبَر التفاعلات الكيميائية التقليدية ضمن العمليات التي لا تتغيّر فيها الكتل بشكلٍ محسوس، لذلك يُستخدَم «مبدأُ انحفاظ الكتلة» ـ الذي صاغه إبيقور (Epicurus) قبل دهور ـ في الكيمياء(*) في غالبية الأحيان.

(*) تعود فكرة انحفاظ المادة إلى إبيقور (341 ـ 270 قبل الميلاد)، ثم نصير الدين الطوسي في القرن الثالث عشر، وعبّر لومونوسوف (Lomonosov) عنها سنة 1748، ولكن أول من صاغَ قانون مصونية المادة بشكل واضح هو الفرنسي لافوازييه (Lavoisier) عام 1789.

مصونية الاندفاع الزاوي (أو عزم كمية الحركة)

إنّ العالَم الذي نعيش ضمنه يتّصف بأنّ قوانين الفيزياء فيه متناظرةٌ دورانياً. ووفقاً لنظرية نوثر يكون **قانون المصونية الموافق للتناظر الدوراني هو قانون مصونية الاندفاع الزاوي**. مثلما يعبّر مفهوم الاندفاع عن قياسٍ للحركة الفيزيائية لمنظومةٍ تتحرّك في خطّ مستقيم يشير إليه مثلاً اتّجاه شعاع السرعة، فإنّ الاندفاعَ الزاوي هو قياسٍ فيزيائي خاصّ بالحركة الدورانية. يتعلّق الاندفاع الزاوي باللاتغيّر الدوراني لقوانين الفيزياء لأنّه أساساً يتعلّق بالحركة الدورانية.

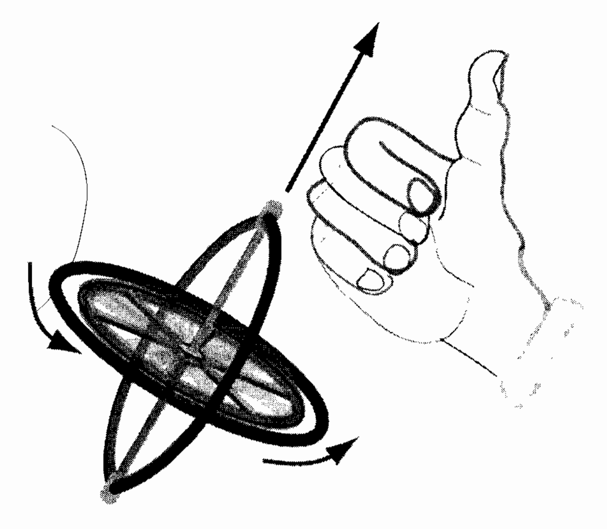
تُخبرنا نظرية نوثر أن الاندفاع الزاوي مرتبط بالدوران كما يرتبط الاندفاعُ عملية بالانسحاب المكاني. في الواقع نحن نعرّف الدوران من خلال شعاع، ولفعل ذلك نستعمل **قاعدة اليد اليمنى**. على سبيل المثال، لنتناول صحن الفريزبي(*) (Frisbee) أو الجيروسكوب(**). يتمّ تعريف الدوران من خلال ثني أصابع اليد اليمنى باتجاه الدوران، وعندها يعرّف الإبهام الإحساسَ بالدوران، فاتجاهُه يشير عندئذٍ إلى ما ندعوه بـ **محور الدوران**: خط مستقيم تخيّلي عمودي على **مستوى الدوران**. تعرّف قاعدة اليد اليمنى الاتجاهَ على محور الدوران (نحو الأعلى أو نحو الأسفل) الذي نصطلح أنّ الدوران يشير إليه. ومع قليلٍ من التمرين، نستطيع الاعتياد على هذه الفكرة عن تمثيل الدوران بشعاع باستخدام قاعدة اليد اليمنى. إن الشكل 9 أبلغ من ألف كلمة لتوضيح هذه القاعدة.

في الحالة البسيطة لدوران كوكبٍ حول نجم ما، يكون الاندفاع الزاوي هو الشعاع الذي نحصل عليه من خلال ثني أصابع يدنا

(*) صحنٌ بلاستيكي يتقاذفه اللاعبون.

(**) أداة لتحديد الاتجاه.

اليمنى باتجاه حركة الكوكب في مداره وملاحظة إلى أين يشير إبهامنا. يكون شعاع الاندفاع الزاوي من أجل كوكبٍ يدور بعكس اتجاه عقارب الساعة ـ عندما يُنظَر إليه من مكان فوق مداره ـ عمودياً على مستوي المدار ومشيراً باتجاه ينطلق من المستوي نحو المراقب.



الشكل 9: يُعرَّف الاندفاعُ الزاوي لجيروسكوب من خلال شعاعٍ تتحدّد جهته باستخدام قاعدة اليد اليمنى.

تحدّد قاعدة اليد اليمنى اتجاهَ شعاع الاندفاع الزاوي لأيّ جسم مدوِّم (يدور حول نفسه) أو حائمٍ في مدارٍ، فما الذي يحدّد سعةَ (طويلة) هذا الشعاع؟ لنفترض أنه لدينا كوكب في مدارٍ دائري حول نجم ثقيلٍ جداً. نرمز لنصف قطر المدار بـ R فيكون اندفاع الكوكب في أي لحظةٍ مساوياً لـ $\vec{p} = m\vec{v}$، حيث $\vec{v}$ شعاع السرعة الذي يكون **مماسّاً** دوماً للمدار (أي ـ في حالة الحركة الدائرية ـ عمودياً على المستقيم الواصل بين الكوكب ومركز المدار وواقعاً في مستوي الدوران). نفترض أنّ النجم ثقيل جداً بحيث يمكن إهمال حركة

ذبذباته. في مثل هذا الوضع، تساوي طويلةُ شعاع الاندفاع الزاوي حاصلَ جداء نصف القطر R بشدة الاندفاع (أي «طويلة» شعاع الاندفاع) التي نكتبها بالشكل $m\,|\vec{v}|$ والتي تعادل حاصل جداء كتلة الكوكب بقيمة سرعته (لا تتغيّر قيمة سرعة الكوكب في حالة الحركة الدائرية). وبالتالي تكون سعة شعاع الاندفاع الزاوي في هذه الحالة مساويةً لـ $m\,|\vec{v}|R$، بينما يكون اتجاهه عمودياً على مستوى مدار الكوكب.

وهكذا يكون لكوكبنا الصغير الحائم في مداره حول النجم سنةً بعد سنة مقدارٌ (شعاعيٌ) مصون ـ هو الاندفاع الزاوي ـ نتيجةً لحقيقة كون قوانين الفيزياء لا تعتمد على اتجاه مجمل المنظومة في المكان. يستعمل العاملون بالعلم عادةً رمز $\vec{J}$ للدلالة على شعاع الاندفاع الزاوي. إنّ الاندفاع الزاوي للكوكب مصون ولا يمكن أن يتغيّر مادامت «منظومتنا (أو جملتنا)» تقتصر على النجم والكوكب لا غير. لو اقترب الآن الكويكب الجوّال سلطان واصطدم بهذه المنظومة الصغيرة، فإنّ الاندفاع الزاوي للنجم مضافاً إليه الكوكب يمكن أن يتغيّر، ولكنْ في هذه الحالة يبقى الاندفاع الزاوي الكلي لمنظومة النجم مع الكوكب ومع الكويكب سلطان مصوناً لا يتغيّر. إذاً طالما بقيت جملة النجم مع الكوكب معزولةً لا تعاني أيّ اضطراب، بقي شعاع اندفاعها الزاوي مصوناً.

تقتضي مصونيةُ الاندفاع الزاوي المداري للكوكب بقاءَ حركته **دوماً** في المستوي نفسه، وإلاّ تغيّر اتجاه الشعاع $\vec{J}$ الذي يتحدّد بقاعدة اليد اليمنى. يمثّل هذا الأمر أحد أهم اكتشافات يوهان كبلر (Johannes Kepler) الذي كان أول من وضع قوانينَ صحيحة لحركة الكواكب. اكتشف كبلر كذلك أنه في أيّ من الحركات الكوكبية في المنظومة الشمسية ـ بما في ذلك المدارات القطع ـ ناقصية بشكل

كبير كمدار المريخ ـ هناك دوماً علاقة عامة تربط بين الزمن اللازم لإتمام الكوكب دورةً كاملةً على مداره وبين سعة هذا المدار. تنجم هذه العلاقة بشكلٍ مباشر من انحفاظ شدّة (طويلة) الشعاع $\vec{J}$. تحتوي إذاً قوانين كبلر التجريبية على النتائج الأساسية لمصونية الاندفاع الزاوي، وهي تمثّل أول الاكتشافات التاريخية لقانونِ مصونيةٍ في الفيزياء يصلح تطبيقه على منظومة ديناميكية تتضمّن قوى وحركات.

يمكن تطبيق مصونية الاندفاع الزاوي، طبعاً، على أيّ منظومةِ مداراتٍ معقّدة لأجسام متعدّدة كوكبية ـ سيّاريّة، مثل منظومة ثلاثة نجوم ـ أو أكثر ـ مرتَبطة معاً ضمن تجمّع ما، وذلك شريطة أن نجمعَ كاملَ الاندفاعات الزاوية المنفردة لكلّ الأجسام في المنظومة. وكما كان الحال مع الاندفاع، فإنّ الاندفاع الزاوي **الكلي** للمنظومة هو الذي يبقى مصوناً، ويمكننا أن نكتب المعادلة الشعاعية $\vec{J} = \vec{J_1}+\vec{J_2}+\vec{J_3}+...$، حيث $\vec{J}$ هو الاندفاع الزاوي الكلي و $\vec{J_i}$ الاندفاعات الزاوية لمختلف مكوّنات المنظومة. وفي الحقيقة إنّ حلّ مسألة الحركات المدارية في أوضاع معقّدة تحتوي على عدّة أجسام باستخدام الورقة وقلم الرصاص لهو مهمة مستحيلة تقريباً، ولا يُعرَف إلاّ عددٌ محدود من الحلول الصحيحة الكاملة في مثل هذه الحالات. يستلزم الحصولُ على نتائج عامة استخدامَ الحواسيب أو اعتماد تبسيطاتٍ هائلة. مع ذلك مهما بلغت درجةُ صعوبةِ مسألةِ الأجسام المتعدّدة، فإننا نضمن أنّ الاندفاع الزاوي الكلي يبقى محفوظاً. تبقى هذه الحقيقةُ صالحةً في الحالة العامة للمسارات القطع ـ ناقصية أو القطع ـ زائدية للمذنبّات ولأمثال سلطان من الكويكبات في هذا الكون، وحتى خلال الاصطدامات بين المجرّات أو السيّارات أو الذرّات أو الجزيئات أو الجسيمات الأولية التي تتضمّن أيّ نوع من القوى في الطبيعة.

يمكن للأجسام الثقيلة كذلك أن تدوّم (تدور حول نفسها مثل الدوّامة)، ولها في هذه الحالة أيضاً اندفاعٌ زاويٌ موافقٌ لهذا النوع من الحركة. تُعَدّ لعبةُ الخذروف (المكّوك) الخاصة بالأطفال أبسطَ مثالٍ يوضّح ظاهرة التدويم. عندما يدوّم جسمٌ ما بـ «سعة تقريبية» مساوية لـ R (يجب التفكير به كنصف قطر الجسم في المستوي الموافق لحركته التدويمية) وبكتلةٍ مساوية لـ m، وحيث تتحرّك أطرافه الخارجية بسرعة v، فإنّ طويلة اندفاعه الزاوي التدويمي تبلغ $|\vec{J}|=kmvR$. يدلّ الحرف k على قيمةٍ عددية ـ مثل 0,793 ـ تميّز شكل الجسم وتوزّع المادة الداخلي فيه (سيلاحظ القارئ الدقيق أنّ قيمة الطويلة ـ إذا وضعنا k جانباً ـ تساوي حاصل جداء سعة الجسم R بطويلة الاندفاع mv).

مع هذه الملاحظة التبسيطية، يمكننا الآن فهمُ كيفيةِ عرضِ إثباتٍ لمصونية الاندفاع الزاوي في محاضرةٍ تعليمية من خلال ما يُدعى عادةً بـ**تجربة نواقيس المغفّل الثلاثة (دمبل)**(*). يقف المعلّم على طاولةٍ قابلة للدوران، ويبسط يديه اللتين تحمل كلّ منهما دمبلاً (احزرْ من هو الدمبل الثالث؟). يبدأ أحدُ التلاميذ بتدوير جملة المعلّم ـ مضافاً إليه الدمبلان ـ الواقف فوق الطاولة (الشكل 10.a)، فتغدو جملة المعلّم مع الدمبلَين إذاً منظومةً مدوِّمة. في البداية يكون التدويم بطيئاً، ولكنْ عندما يقرّب المعلّم يديَه (وبالتالي الدمبلَين) إلى صدره، فإننا نلاحظ أنّ سرعة دورانه v تزداد بشكل محسوس (الشكل 10.b). لماذا؟

ما يجب أن يبقى ثابتاً هنا هو الاندفاع الزاوي الكلي بسبب مصونيته، وتبلغ سعته $|\vec{J}|=kmvR$. عند تقريب الدمبلَين إلى الصدر

(*) الدمبل (Dumbbell): كرتان حديديتان يربط بينهما قضيب.

ينقص «السعة نصف القطرية» R، وحيث إن قيمة الاندفاع الزاوي $|\vec{J}| = kmvR$ يجب أن تبقى ثابتة، فإنّ على قيمة السرعة v أن تزداد لتعويض النقص في R[9].

بهذه الطريقة يستفيد الراقصون الفنيون على الجليد من مصونية الاندفاع الزاوي لإجراء تدويماتٍ مثيرة للإعجاب على الجليد ولإتمام دوراناتٍ رائعة في الهواء. كذلك عندما ينكمش وينهار قلب نجم عملاق جبّار خلال حادثة المستسعرة الحرارية الفائقة (السوبرنوفا)، فيمكن لبقيّةٍ منه أن تشكّل نجماً نترونياً صغيراً يحمل

---

(9) لقد قمنا بتبسيط المناقشة هنا كثيراً، بينما من الأفضل عند مناقشة مفهوم التدويم (السبين) ـ أو أيّ حركة دائرية ـ أن نتكلّم عن «شعاع السرعة الزاويّة» الذي نرمز له عادةً بالحرف اليوناني $\vec{\omega}$ تساوي طويلةُ (سعة) هذا الشعاع عددَ الراديانات (تذكّر أنّ 360 درجة تساوي 2π راديان) التي يدورها الشيء في ثانية واحدة، أمّا جهة $\vec{\omega}$ فتتعرّف بواسطة قاعدة اليد اليمنى. من أجل كوكبٍ يتحرك في مدارٍ دائري تساوي طويلة (سعة) السرعة $|\vec{v}| = |\vec{\omega}R|$، وبالتالي تكون طويلة (سعة) الاندفاع مساويةً لـ $|\vec{p}| = |m\vec{\omega}R|$ (ويكون حامله مماسّا لمدار الكوكب)، أمّا شعاع الاندفاع الزاويّ فيكون عمودياً على مستوى المدار وذا جهةٍ تتحدّد بقاعدة اليد اليمنى وتساوي طويلته (سعته) المقدار $|\vec{J}| = |m\vec{\omega}R^2|$.

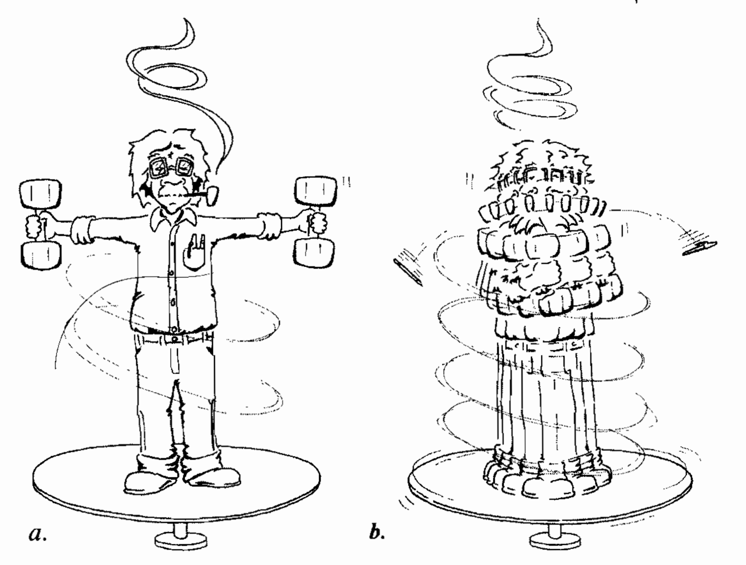
عندما يدوّم (يدور) جسمٌ بـ «نصف قطر تقريبي» R وكتلة m حول محورٍ ما بسرعة زاويّة $\vec{\omega}$، فإنّ الاندفاع الزاويّ لحركته التدويمية (السبينية أو الدورانية) هذه يبلغ $\vec{J} = km\vec{\omega}R^2$، حيث k عدد يميّز شكل الجسم والتوزّع الداخلي للمادة فيه. على سبيل المثال إذا كان الجسم قرصاً وتمّ الدوران في مستوى هذا القرص فإنّ $k = 1/2$، بينما لو كان الجسم حلقةً لصار $k = 1$. تتعيّن قيمة k من خلال جمع كلّ الاندفاعات الزاويّة المدارية الدائرية لجميع الأجزاء (الذرّات) التي تؤلّف الجسم (يتضمّن هذا إجراء حسابٍ تكاملي). نعرّف عادةً «عزم العطالة» لجسم ما بأنه $I = kmR^2$، وبالتالي فهو مقدار يميّز شكل الجسم وحجمه وبنيته الداخلية أو «أحشاءه» نفسها. يساوي الاندفاع الزاويّ لشيءٍ يتحرّك حركة تدويمية دورانية إذاً $\vec{J} = I\vec{\omega}$. إنّ الشيء الذي يبقى ثابتاً في تجربة نواقيس المغفّل الثلاثة (دمبل) هو الاندفاع الزاويّ الكلّي $\vec{J} = I\vec{\omega}$. عبر تقريب الدمبلَين من الجسم يكون عزم العطالة I للمعلّم ـ والمتناسب مع R^2 ـ قد نقص، وحيث إنّ $\vec{J} = I\vec{\omega}$ يجب أن يبقى مصوناً، فإنّ $\vec{\omega}$ تزداد بشكل محسوس متناسبٍ مع $\propto 1/R^2$.
هذا هو السبب الذي يجعل هذه التجربة مثيرةً للإعجاب إلى درجةٍ كبيرة: فتقسيم R على اثنين يُزيد تواتر الدوران الزاويّ بمقدار أربع مرّات.

معه مجمل الاندفاع الزاوي التدويمي، لذلك يجب على النجم النتروني أن يدوّم بمعدّل عالٍ جداً. تُطلق مثل هذه الكائنات نبضاتٍ منتظمة من الضوء عند تدويمها، يخلقها حقلها المغناطيسي الهائل الذي ينطلق للخارج بسرعة عبر بقايا الانفجار المحيطة. تُدعى تلك الكائنات اللافتة للنظر باسم النجوم النبضية(*) (البَلزارات) (Pulsars).

تساهم مصونية الاندفاع الزاوي ـ وبالتالي ثبات جهة الشعاع $|\vec{J}| = kmvR$ في المكان ـ في استقرار عدد من النظم الفيزيائية. إنّ الجيروسكوب هو عبارة عن كتلةٍ ثقيلة مدوِّمة تحافظ على اتجاهها في الفضاء عندما توضع ضمن أداة واقية باحتكاكٍ ضئيلٍ للغاية تُدعى بالغِمبَل (Gimbal). تُستخدم الجيروسكوبات كأدوات مساعدة للملاحة عندما تكون معرفة الاتجاه مهمة. تقدّم الدراجات الهوائية مثالاً آخر على منظومةٍ يتحقّق استقرارُها من خلال مصونية الاندفاع الزاوي، حيث يوفّر دوران العجلة اندفاعاً زاوياً محسوساً يساعد على إبقاء الوضع المنتصِب للدراجة. يتحقّق استقرار صحون الفريزبي وهي تطير في الهواء من خلال الاندفاع الزاوي. يمكن جعل رصاصات البندقية وقذائف المدفعية تدوِّم من خلال «الأخاديد الحلزونية» ـ أي حفرِ أثلامٍ في الوجه الباطني لاسطوانة المدفع لتحقيق تدويم القذائف ـ وذلك من أجل جعل تحليقها مستقراً بشكل أكبر. يضرب اللاعبون الرئيسيون الخلفيّون في لعبة كرة القدم الأميركية الكرة بشكلٍ يجعلها تدوّم، وهذا يُكسبها استقراراً وبالتالي

(*) لا يمكن ملاحظة الإشعاعات الكهرمغناطيسية التي يُصدرها النجم النتروني الدوّار والمغنط إلاّ عندما تكون الحزمة الصادرة متّجهةً نحو الأرض، ممّا يعطي النجمَ طبيعتَه النبضية.

دقةً عندما يتمّ تمريرها (المأمول) لجعلها في النهاية تلمس الأرض. يحافظ كوكب الأرض نفسه على اتجاه محور دورانه المتّجه تقريباً نحو نجم القطب (النجم الأخير في مجموعة الدب الأصغر)، عندما تدوّم الأرض حول نفسها خلال دورة النهار والليل.



الشكل 10: تجربة نواقيس المغفّل الثلاثة. في a يمسك الأستاذ بيبودي (Peabody) بيدَيه المتدّتَين زوجاً من الدمبلات، ويبدأ بالدوران بشكل بطيءٍ جداً. في b يسحب يدَيه وبالتالي يقترب الدمبلان من صدره. يسبّب انحفاظُ الاندفاع الزاوي زيادةَ سرعته الزاوية بشكل كبير (الرسم التخطيطي لـِ: شي فيريل (Shea Ferrell)).

تمتلك جميع الكواكب في منظومتنا الشمسية ـ مع استثناءاتٍ قليلة ـ اندفاعات زاوية مدارية تتجّه كلّها في الاتجاه نفسه (العمودي على مستوي دوران الكواكب المدعو بـ مستوي دائرة البروج (Ecliptic) والمعرَّف ـ كما خمّنْت ـ بقاعدة اليد اليمنى). إنّ القسم الأكبر من الاندفاع الزاوي للمنظومة الشمسية تحمله الكواكب

البعيدة: المشتري وزحل وأورانوس ونبتون. يماثل اتجاهُ الاندفاع الزاوي التدويمي للشمس اتجاهَ الاندفاعَ الزاوي المداري للكواكب. بالإضافة إلى دوران الكواكب حول الشمس، فإنّ جميعها تقريباً تدوِّم حول محاورَ تماثل اتجاهاتُها إلى حدّ ما اتجاهات دوراناتها المدارية (هناك استثناء وحيد في كوكب الزهرة الذي يدوّم بشكلٍ معاكس لدورانه المداري). يمثّل كلّ هذا دلائلَ على أنّ منظومتنا الشمسية قد تمّ تكوينها ابتداءً من غمامةٍ مشتركةٍ بين نجمية، كانت هي نفسُها مؤلَّفةً من غبارٍ حائم دائرٍ وبقايا منتشرة لانفجاراتِ نجومٍ عملاقة، وكان لها اندفاعٌ زاوِي بدائي سمح بتعريف المداراتَ الكوكبية الآن. بقي الاندفاع الزاوي المداري الأصلي هذا مصوناً عندما تكوّنت المنظومة الشمسية، وبقيت آثاره مدموغةً في الاندفاعات الزاوية المنفردة للشمس والكواكب، فقدت الشمس خلال حياتها مقداراً مهماً من اندفاعها الزاوي التدويمي الأصلي من خلال إصدارها للرياح الشمسية المليئة بالأشعة الكونية، ممّا بدّد وشتّت الاندفاع الزاوي الشمسي إلى الفضاء الخارجي.

أكّدت المعطيات التجريبية المتراكمة خلال المئة سنة ونيّف الماضية مصونيةَ الاندفاع الزاوي عند المقاييس العيانية للمجرات والكواكب والناس والآلات، بالإضافة إلى تحقّقها عند المقاييس المجهرية للذرات والجسيمات الأولية. نعلم الآن ـ بفضل إيمي نوثر ـ أن هذه المعطيات تقتضي أنّ المكان متناظرٌ كروياً: فلا اتجاهَ مميّزاً في المكان، وجميع الاتجاهات متكافئة في ما بينها، يرتبط بعضها ببعض من خلال الدورانات التي تشكّل تناظراً لقوانين الفيزياء. إنّ ظاهرةَ مصونية الاندفاع الزاوي أساسيةٌ لفهم سلوك الجزيئات والذرات والنوى والمكوّنات الأساسية للمادة، أي الجسيمات الأولية. يقود الاندفاعُ الزاوي أخيراً إلى ظواهرَ كمومية مقلقة ونتائج غريبة عن سلوك المادة تحت شروطِ استثنائية، وهذه أمورٌ سنعود إليها لاحقاً.

الفصل السادس

العطالة

سالفياتي (Salviati): . . . قل لي ماذا سيحدث للجسم القابل للحركة نفسه لو كان فوق سطحٍ غير مائلٍ لا للأعلى ولا للأسفل.
سيمبليتشيو: دعني أفكّر للحظةٍ هنا بالإجابة التي عليّ تقديمها. . . لا أرى أيّ سببٍ هنا لتسارع الجسم أو تباطؤه. . .
سالفياتي: عندها، لو كان مثل هذا المكان غيرَ محدودٍ هل تغدو الحركة عليه غير محدودةٍ هي أيضاً؟ أهذه حركة دائمة أبدية؟
سيمبليتشيو: يبدو لي هذا

غاليليو غاليليه
حوارٌ عن النظامَين العالميّنَ الرئيسَين

هناك مقطعٌ في كتاب غاليليو **«حوارٌ عن النظامَين العالميّيَن الرئيسَين»** يناقش فيه بطله سالفياتي ـ وهو منشقّ مؤمن بنظرية كوبرنيكوس أي «البدعة» القائلة بمنظومةٍ شمسية مركزها الشمس ـ معتقداتِه مع المحافظ سيمبليتشيو وهو مناصرٌ شديد الولاء لكونٍ مركزه الأرض ولقوانين الحركة الخاطئة من أساسها التي وضعها أرسطو وكانت هي الشريعةَ المعتمَدة لدى الكنيسة الكاثوليكية. لقد كتب غاليليو مؤلَّفه باللغة العامية الإيطالية، وبيع كلّ ما طُبع منه قبل

أن تحرمه الكنيسة ويُقتاد غاليليو نفسه إلى محاكم التفتيش. وعلى الرغم من كون هذا المقطع موجّه للإنسان العامي، فإنه كان مسلياً، تهكمياً وكان شرحاً بسيطاً لمبدأ العطالة[1].

يبدأ العلم الحديث ـ وفي واقع الأمر عالَمنا الحديث ذاته ـ مع هذا المبدأ، فهو أهمّ قانون من قوانين الطبيعة التي نعرفها. ويمكن إعادة صياغته بالشكل الذي استعمله نيوتن كقانونه الأول في الفيزياء: **يستمرّ الجسم الساكن أو المتحرّك حركةً مستقيمةً منتظمةً في سكونه أو في حركته المستقيمة المنتظمة ما لم تؤثّر عليه قوة خارجية.** هذه العبارة هي الأكثر أساسيةً في ما يمكننا التصريح به عن الحركة، ونستطيع أن ندعوها المبدأ الأساسي الذي يحكم الحركة.

في الحقيقة إنّ قوانين الفيزياء التي يخضع لها أيّ كائنٍ تبقى نفسها ـ أي إنّها لامتغيّرة ـ في جميع حالات الحركة المنتظمة؛ ومن ثم فإنّ مبدأ العطالة هو في جوهره **تناظرٌ للطبيعة**: تناظرُ القوانين الفيزيائية أو تكافؤها في جميع حالات الحركة المنتظمة لجسم معيّن أو لنا أو لمخبرنا أو لأيّ شيءٍ مهما كانت طبيعته. لقد فهم غاليليو مبدأ العطالة بهذه الطريقة، واستطاع أن يميّز المفهوم ـ المفتاح الرئيسي لـ**جملة المقارنة ـ المرجع (المَعْلَم) العطالي**، وهذا ظاهرٌ في شخصيات أبطاله ومناقشاتهم حول إسقاط الأحجار من أعلى صواري المراكب الساكنة أو المتحركّة بحركة منتظمة في بحر هادئ.

عندما نحاول شرح ماهيةِ مفاهيمَ من نوعية مفهوم العطالة ونسعى إلى ربطها بفكرة التناظر، فإننا نستلهم أفكاراً منيرة حول

---

(1) يمكن الاطّلاع على موجز تاريخي في كتاب: Will Durnat and Ariel Durant, *The Story of Civilization* (New York: Simon & Schuster, 1966), vol. 7: *The Age of Reason Begins*.

العلاقات بين الأشياء المختلفة في عالَمنا الفيزيائي، ونلتقي بمفرداتٍ جديدة وواسعةً. رغم ذلك فإننا لا نعرف مطلقاً **لماذا** يوجدُ مبدأٌ للعطالة أو **لماذا** يوجَد أيٌّ من التناظرات الموافقة في الطبيعة، فجلُّ ما يقدر العلم على فعله هو **ملاحظة** أمورٍ وأشياءٍ متنوعة وملاحظة كيفية حياكتها معاً أو ارتباطها بعضها ببعض، وربّما معرفةُ كيفية وصفها وطريقة استعمالها. لكن تظلّ أمامنا دوماً «**لماذا**» باقيةٌ لم نجب عليها وأشياءٌ أخرى كثيرةٌ تحتاج لتفسير. ومع أننا قد لا نستطيع أبداً فهم سبب وجود العطالة، إلاّ أنه يتوجّب علينا دوماً ملاحظة **أنّ** العطالة موجودة.

كان ريتشارد فاينمان (Richard Feynman) واحداً من أعظم الفيزيائيين النظريين في القرن العشرين، وسيبقى مثلاً أعلى وبطلاً بالنسبة إلى كثيرٍ من العلماء ـ ومنهم مؤلِّفا هذا الكتاب ـ حتى اليوم[2]. كان فاينمان في طفولته فضولياً على نحوٍ مبكّرٍ في ما يخصّ

(2) يُعتَبر فاينمان ـ بالتعاون مع آخرين ـ أحد أهمّ مُطوِّري نظرية الإلكتروديناميك الكمومي التي تصف بشكل دقيق تفاعلَ الإلكترون مع الفوتون، وهو الذي ابتكر «مخطّطات فاينمان»، وهي طريقةٌ تخطيطية تستخدم الرسوم لتنظيم الحسابات المعقّدة التي تحكم حركة المادة وتفاعلاتها عند المقاييس الكمومية (انظر الفصل 11). وقد قام فاينمان كذلك بإسهاماتٍ هامّة أخرى كثيرة العدد في تحسين فهمنا للطبيعة، ومنها ابتكاره لصياغةٍ جديدة لقوانين ميكانيك الكمّ ثبتت ضرورتها في التطوّرات الحديثة لفيزياء الجسيمات. إنّ كلّ العاملين في مجال علم الفيزياء يعرفون من دون شكّ «محاضرات فاينمان» الشهيرة، إذ لايزال هذا الكتاب الجامعيّ المخصَّص لمقرّر الفيزياء بأجزائه الثلاثة مهماً جداً لتدريس هذا المقرَّر في الجامعات لغاية اليوم، وذلك رغم مرور أكثر من أربعين سنة على كتابته في الستينيات في كالتيك (معهد كاليفورنيا التكنولوجي) (Caltech). في إحدى الفترات القصيرة الماضية أضحى فاينمان شخصاً معروفاً لعموم الناس في الأمة الأميركية بمجملها، حيث كان يعمل حينئذٍ مع اللجنة التي حقّقت في أسباب كارثة مكوك الفضاء تشالنجر (Challenger)، فقد بيّن فاينمان ـ بشكلٍ تخطيطي وفي بثّ تلفزيوني حيّ ـ إمكانيةَ تعرّض الحلقة المطاطية ـ ذات الشكل المشابه لحرف O والمستعملة في أجهزة دعم وتقوية الدفع المعتمد على الوقود الصلب =

العالَم، وكثيراً ما كان يُجري بنفسه في المنزل تجاربَ ذاتية ـ كصنع الخمر ـ قام هو بتوفير أدواتها. وفي ما بعد كان يذكر في أحيانٍ عديدة علاقتَه الحميمة والمفعَمة بالمحبة مع والده الذي شجّعه على استكشاف العالَم بطريقةٍ أصيلةٍ حقاً، ففي أحد الأيام لاحظ فاينمان ـ وهو لايزال طفلاً يافعاً ـ ظاهرةً لمبدأ العطالة، وكان محظوظاً أنّ والدَه «بابا» كان هناك ليطبعَ في نفسه إحساساً بالغموض والرغبة في التعليل حول اكتشافه الصغير هذا. يبيّن اللقاءُ التالي بشكلٍ جليّ واضح جميعَ العناصر الصحية للطريقة السليمة في مقاربة العلم وللتعليم الصحيح:

علّمني والدي أن ألاحظ الأشياء، ففي أحد الأيام كنتُ ألعب بِـ «عربةِ النقل السريع» وهي عربة صغيرة يحيطُ بها «درابزين»، وكنتُ قد وضعتُ داخلها كرة. عندما جررتُ العربةَ لاحظتُ أمراً غريباً في الطريقة التي تحرّكت بها الكرة. ذهبتُ إلى والدي وقلت له: «بابا، لقد لاحظتُ أمراً معيّناً أتمنى أن تساعدني على فهمه. عندما جررتُ العربةَ للأمام تدحرجت الكرة إلى مؤخرة العربة. بينما عندما كنتُ أجرّ العربة، قمتُ بإيقافها فجأةً، فرأيت الكرة تتدحرج نحو المقدّمة. لماذا حدث هذا؟»

قال لي: «لا أحد يعرف سبب هذا الأمر». «ينصّ المبدأ العام على أنّ الأشياء المتحركة تميل إلى أن تبقى متحركة، بينما تنزع الأشياء الساكنة إلى البقاء ساكنة، إلاّ إذا أثّرْتَ عليها بقوة. يُدعى هذا الميل

= [وقود على شكل حبيبات أو «بودرة» يُستعمل في الصواريخ] في الصاروخ ـ إلى التجمّد وبالتالي إلى نقصٍ في مرونتها وليونتها، وهذا ما أدّى إلى تسرّب الغازات من خلال الوجوه الجانبية لمكّوك الفضاء وقاد في النهاية إلى المصير الكارثيّ له. إنّ تقرير فاينمان المعارض هذا عن كارثة تشالنجر تضمَّن بشكلٍ استباقي الإشارةَ إلى خطر كارثة المكّوك كولومبيا (Columbia) التي وقعت بعد ذلك الحين بسبعة عشر عاماً.

والنزوع باسم العطالة، ولكن لا أحد يعرف سبب صحة هذا المبدأ».

الآن يأتي دور التجاوب العميق لوالدي مع تساؤلي، فهو لم يكتفِ بإعطائي اسم [العطالة]، بل تابع يقول: «إذا نظرتَ إلى العربة من الجانب [عندما تبدأ الجرّ]، فإنك سترى أنّ العربةَ هي ما يتمّ جرّه بينما تبقى الكرة ساكنة. وفي واقع الأمر ـ وبسبب الاحتكاك ـ ستبدأ الكرة بالحركة قليلاً إلى الأمام بالنسبة إلى الأرض... ولكن الكرة] لن تتحرّك إلى الوراء».

عدت راكضاً إلى العربة الصغيرة، ووضعتُ الكرة مرة أخرى داخلها، ثم جررت العربة. بالنظر [من الجوانب]، رأيتُ أنه كان على حقّ فعلاً! فقد تحرّكت الكرة قليلاً إلى الأمام بالنسبة إلى رصيف المشاة [وذلك عندما تحرّكت العربة إلى الأمام بمقدارٍ كبير، وهذا التحرّك أدّى بعد ذلك إلى اصطدام مؤخرة العربة بالكرة][3].

تقدّم قصة فاينمان تجربةً بسيطة يمكن لأيّ شخص إجراؤها في المنزل أو في قاعة الصف. في الحقيقة يوجد كثيرٌ من التجارب التي توضّح مفهوم العطالة، لأننا نصادف العطالة ونختبر آثارها في كل الأوقات من حياتنا. عندما تتزايد سرعتنا أي نتسارع خلال قيادتنا للسيارة أو في أثناء إقلاع الطائرة، فإننا نشعر بدفع إلى الوراء ونحن جالسون في مقاعدنا، فهنا تمثّل أجسامُنا الكائناتِ الفيزيائية التي تميل إلى البقاء ساكنةً، مما يجعل ظهور مقاعدنا تؤثّر علينا بقوة. وعندما نحاول الوقوف بسرعة ـ كأن نضغط على المكابح في السيّارة ـ فإننا ككائناتٍ فيزيائية نميل إلى البقاء في حالةِ حركةٍ منتظمة، وبالتالي

(3) Richard P. Feynman, *What do You Care what Other People Think?: Further Adventures of a Curious Character* (New York: Norton, 1988), p. 15.

ننزع إلى الاستمرار في الحركة والطيران إلى الأمام، إلاّ أنّ أحزمة الأمان تؤثّر فينا بقوة تعيدنا إلى وضع السكون بالنسبة إلى السيّارة. يزوّدنا المشي بخطى سريعة فوق رقعةِ أرضٍ مبلولة أو فوق سجّادة رخوة القوام بمثالٍ نموذجي عن العطالة، حيث تُوقف أقدامُنا فجأةً حركتَها الأمامية بينما يستمر القسم الأعلى من الجسم بالحركة إلى الأمام من خلال العطالة.

ورغم ذلك يبدو مبدأ العطالة في الحقيقة مغلّفاً بغطاء من الغموض والإبهام، فمع أنّ العطالة يمكن فعلياً «ملاحظتها» ببذل قليلٍ من الجهد، إلاّ أنّ مظهرها يتصّف دوماً بالدقة والحِذْق. إذ نجدها مختبئةً في خلفية المشهد وبشفافية شبه تامة، ما لم تتضمَّن نتائجُها أموراً درامية مفاجئة لحظياً، كأن تسبّب حادثاً مصحوباً بكارثة. لقد تطوّرت حياتنا مع العطالة دائمة الوجود فتمّ تكيُّفنا وفقاً لذلك، وهكذا أصبح بإمكاننا التجوّل والطواف في العالَم الفيزيائي من دون حاجة إلى التوقّف من أجل ملاحظة العطالة والتأقلم مع آثارها بشكل مستمر.

عندما نأخذ ما سبق بعين الاعتبار، لابدّ أن نتساءل لماذا لم يلاحظ الأشخاص الأكاديميون العطالةَ في نهاية الأمر إلاّ في زمنٍ متأخّرٍ نسبياً في التاريخ (فعلياً عند نهاية عصر النهضة)؟ من المؤكّد أنه وُجد على مرّ التاريخ كثيرٌ من الناس الأذكياء في الثقافات والحضارات المختلفة، بمن فيهم الفلاسفة اليونانيون العظماء من فيثاغورس إلى أرخميدس. ومع ذلك وقع الجميع في نوعٍ من اختلاط الأمور في ما يخصّ العطالة وهي الخاصة الأساسية للحركة، فما الذي جعلها عصيةً هكذا على الفهم حتى بالنسبة إلى أهم المفكّرين والمراقبين في العصور القديمة؟

لقد بحث الفلاسفة اليونانيون القدماء ـ الذين اخترعوا علم

الهندسة ـ عن تفسيرٍ لكيفية عمل الأشياء كلّها في عالمنا الفيزيائي، ونظروا ـ خلال سعيهم هذا ـ إلى التناظر كمبدأٍ توجيهي أساسي ـ تماماً كحاله اليوم ـ وذلك استناداً لتقاليدهم وخبراتهم في علم الهندسة. ووجدوا أنه إذا قُدّر لظاهرةٍ طبيعية ـ مثل حركة الكواكب في السماء ـ أن تُفسَّر عبر نظريةٍ تتضمّن التناظر، فإنّ هذا التفسير يُعتَبر مرضياً كلّ الرضا. إذ إنّ النظرية ستكون عندها قد كشفت عن حقيقةٍ داخلية وعميقة في الطبيعة، وبالتالي غدت قابلةً أكثر فأكثر للتصديق.

تاريخ موجز عن العطالة والتناظر ومنظومتنا الشمسية

بالرغم من كل ما ذكرناه كان مفهوم الحركة بغياب الاحتكاك ومفهوم الخلاء المثالي يمثّلان قفزةً مفاهيمية كبيرةً صَعُب إدراكها في زمن الفلاسفة اليونانيين القدماء. لقد ترافقت غالبية التجارب اليومية في ذلك الحين بظواهر مميّزة كالتعرّق وصدور أصوات الحيوانات والتأوّهات من شدة التعب، ومع الانتباه للظروف الواقعية لتلك التجارب التي منها مثلاً نقل الأحجار الثقيلة وجِرار زيت الزيتون في العربات الخشبية ذات العجلات المهترئة والألواح المتهالكة (لم تكن القبّعات الواقية أو أحذية الأمان بالتأكيد موجودةً في ذلك الوقت)، فمن المؤكّد أن ذلك أوحى خطأً بأنّ الأجسام الثقيلة لا تتحرّك «حركةً منتظمةً في خط مستقيم» **ما لم** نؤثّر عليها بقوة ما، فظاهر الأمور يرينا أنّ جميع الأجسام المتحركة تميل بعد برهة من الزمن إلى التوقّف والوصول إلى حالةِ سكونٍ طبيعية (وهذا ما قاله أرسطو عن الموضوع). وهكذا بدت الكتلة في أغلب الأحيان مقياساً لنزوع الجسم لأن يعود إلى حالة السكون وأن يولِّدَ ذلك الشعور بالتعب، فتصدر التأوّهات وأصوات النخير عند رفعه أو دفعه أو جرّه. لقد عاش الإغريق في عالَم هيمن عليه الاحتكاك؛ وكانت من الصعوبة بمكانٍ ملاحظة العطالة فيه، فلم يستطيعوا فصلَ مفهوم الاحتكاك عن

المفهوم النقي للحركة البحتة أي مفهوم الحركة المثالية. ونعتقد أن هذا هو السبب في وصول الإغريق لمفاهيم أساسية خاطئة عن الحركة[4].

لنقارن تلك الأوضاع مع تجربة فاينمان الذي لاحظ وهو طفلٌ صغيرٌ تجلّياً للعطالة عبر استخدام عربةٍ للنقل السريع مع كرة. إنّ هذه التجربة البسيطة تُعَدُّ في واقعها رغم كلّ شيء إنجازاً تقانياً حديثاً عالي المستوى، فالعربة هنا يغلب أن تكون ذات حواملَ فولاذية شبه معدومة الاحتكاك مستندة على محور دورانٍ مصنوع كذلك من الفولاذ مع تزييتٍ جيّد، إضافةً لكون عجلاتها دقيقةَ السبْك وإطاراتها تسمح لها بالتدحرج بشكلٍ سلس. وهذه العربة تقف فوق سطح أملس ـ كرصيفٍ مُبلّط ـ وليس فوق شارعٍ معبّد يدوياً بالحجارة. أمّا الكرة في نفس التجربة فيغلب أن تكون كُرة مثالية حتى لو كانت من النوع رخيص الثمن سهل التوافر مثل كرة تنسٍ يمكن شراؤها من المخزن المجاور للمنزل. كلّ هذا هو من نتاجات العصر الحديث: تكنولوجيا غير مكلفة ومنتشرة بشكلٍ تجاري بحيث يسهل الحصول عليها حتى من قبل طفلٍ صغير عبقري ترعرع خلال فترة الكساد الأعظم تحت كنفِ والدٍ ملهِم وصبور وحنون ومهتمّ سيكتشف ابنه ذات يوم الإلكتروديناميك الكمومي. من المؤكّد أنه لم يتسنّ للإغريق القدماء لسوء حظّهم هذا النوع من البنية التحتية.

(4) يبدو الأمر كما لو كان في ذهن الإغريق القدماء معادلةٌ عن الحركة: تساوي القوة لحاصل جداء الكتلة بالسرعة، أي $\vec{F} = m\vec{v}$. ويعني هذا أنه لتحريك جسمٍ ما بسرعة ثابتة محدودة نحتاج لتطبيق قوّة، فإذا كان الجسم أثقل، فإننا نحتاج إلى قوة أكبر؛ وتكون الحركة دوماً في جهة القوة المطبَّقة. يجب هنا التأكيد والتشديد على أنّ هذه **ليست** المعادلة الصحيحة للحركة، فمعادلة نيوتن $\vec{F} = m\vec{a}$، حيث $\vec{a}$ التسارع ـ أو تغيّر السرعة في وحدة الزمن ـ هي المعادلة الصحيحة.

مع ذلك نتيجةً لانصراف الإغريق في بعض الأحيان بعيداً عن العالَم الأرضي الذي يهيمن عليه الاحتكاك إلى التحديق في السموات، بدا لهم أنّ هناك في تلك الميادين أمراً ما مختلفاً. لقد بدا أنّ الكواكب تتحرك في السماء ضمن نماذج منتظمة محدّدة؛ مثلها في ذلك مثل الشمس والقمر والنجوم. وتبيَّن بشكلٍ واضح وجود تناظرات في الشكل والحركة والزمان والمكان هناك في الأعالي (وبالتالي ربما يكون هنا مسكن الآلهة!!). لذا كان جليّاً أنّ أمراً مقدّساً ما ـ أو ذا هدفٍ قُدسيّ ـ هو الذي **يسيّر** الكواكب (بمعنى أنه «**يدفعها**» في مساراتها. وهكذا استحضر المفكّرون القدماء ـ خلال محاولاتهم لتفسير سلوك الكون ـ نوعاً من القدسية (هو **التناظر**) كمبدإٍ تعريفي لتفسير تسيير (دفع) الكواكب عبر السموات. ووصلت هذه الفكرة إلى أوجها عند أفلاطون ثم أرسطو اللذين رفعا فكرة الحركة الدائرية المثالية إلى مرتبة المبدأ التناظري التعريفي والمُلزِم للفلك.

تمّ شحذُ أفكار الهندسة والمنطق من أيام فيثاغورس ـ الذي وُلد حوالي عام 569 ق.م ـ إلى عصر أرسطو ـ الذي وُلد في سنة 384 ق.م ـ كأدواتٍ لفهم الظواهر الطبيعية. كما ذكرنا سابقاً، لقد تمّ فهم تركيبة المنظومة الشمسية بشكل صحيح من قِبل الفلكيّ أريستاركوس، الذي وضع الكواكب ومساراتها في أماكنها الصائبة، واعتبر القمر يدور حول الأرض بينما كانت الشمس في مركز المنظومة كلها. لذلك كان أريستاركوس بحقّ السلفَ البشير لكوبرنيكوس.

ولكن للأسف تطوَّرت الأمور اللاحقة بحيث غدَت لأسبابٍ متنوّعة عبارةً عن مجرّد هراء من الطقوس البعيدة عن العلم في قسمها الأكبر، بل صارت في نهاية الأمر عقيدةً لا يمكن الحيود عنها. بدأ عصر الإغريق الذهبي بالانحدار والتدهور تحت ضغط

القلاقل والثورات السياسية والاقتصادية. كان أفلاطون وأرسطو في طبعهما كلْبيَّين تنتابهما الريبة من العلم والفلك المبنيَّين على رياضيات منطقية، إذ كانا يفضِّلان عليهما نوعاً من الفلسفة الطبيعية المبنية على الاعتقاد والإيمان؛ وبذلك ظهرا كمحاميَّي دفاع عن فوائد مجتمع مرتّب بشكل مثالي مع حكم سلطوي يُخضِع الفردَ وحقوقَه لمصلحة الدولة. تمّ تضخيم كلّ هذه المظاهر والمضامين في سلوك الشخصين لاحقاً مع بزوغ وانتشار مدرسةٍ متطرفة ومحافظة وقوية ومذهبية هي المدرسة الأفلاطونية الجديدة، وعن هذا يقول المؤرخ آرثر كوستلر في القرن العشرين: «لقد تمّ فصل الفيزياء عن الرياضيات، وأضحت قسماً تابعاً لعلوم اللاهوت»[5]. كان إيمان أرسطو ثابتاً وراسخاً بكونٍ مركزه الأرض وبقدسية التناظر الكامل للمدارات الدائرية كمبدأين يحكمان السموات، لذا مجّد الدائرة والكرة على أنّهما التجسيدُ الكامل للتناظر، وأعلن أنّ جميع الأجسام الفلكية ـ الشمس والقمر والكواكب والنجوم ـ عبارةٌ عن أجسام كروية. تشربّت في نهاية الأمر عقيدةُ الكنيسة الكاثوليكية السلطوية هذه الفكرةَ وتبنّتها، وصار الأكاديميون يحاولون توفيقَ هذا الإطار البنيوي النظري مع الحركات الملاحَظة للكواكب بدلاً من وضعِه موضعَ التساؤل.

عاش في القرن الثاني بعد الميلاد في مدينة الإسكندرية في مصر فلكيٌّ يوناني اسمه كلاوديوس بطليموس (Claudius Ptolemy). تمكّن بطليموس من فهم فلسفة أرسطو، واقترح نظريةً غدت

(5) Arthur Koestler, *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*, With an Introduction by Herbert Butterfield (London; New York: Arkana, 1959),

كان كوستلر نصيراً قوياً لكبلر، حيث رآه الشخصية الرئيسية في قصّة إيضاح الفيزياء وتجلّيها.

«النموذج المعياري» للكون. كانت نظريته نظريةً دقيقةً رياضياتياً، وقد استمرّت حوالي ألف وخمسمئة عام (وهي بذلك تحمل الرقم القياسي لغاية اليوم بين جميع النظريات الفيزيائية في استمرار الصلاحية، إذا ما استثنينا الأديان). افترضت نظرية بطليموس ـ تبعاً لأفكار أرسطو ـ أنّ الشمس والقمر والنجوم والكواكب أجمع تدور حول الأرض. وأكّد بطليموس وجود نار الجحيم في مركز الأرض، بينما اعتبر جنان السموات موجودة في الأطراف البعيدة الحدّية لهذه المنظومة الكونية.

تبدو الشمس والقمر والنجوم فعلاً حائمةً حول الأرض في مداراتٍ يومية دائرية. بالمقابل فإنّ الكواكب تجول وتتحرّك عبر السماء بالنسبة إلى النجوم، لكنها غالباً ما تغيّر من اتجاه حركتها بالنسبة إلى هذه النجوم، فأحياناً تعكس اتجاه الحركة (ونقول عندها إنّ حركتها **متراجعة**) ثم تعكس الاتجاه مرة أخرى لتعود إلى اتجاهها الطبيعي (حركة **متقدِّمة**)(*). أدخل بطليموس مفهوم **فلك التدوير** إبيسايكل (Epicycle) لتفسير تناوب السلوك المتراجِع والمتقدِّم لحركة الكواكب بالنسبة إلى «النجوم الثابتة». تمّت استعارةُ فكرةِ فلك التدوير في الحقيقة من الفيلسوف الإغريقي هيباركوس (Hipparchus) وهو سابقٌ لعصر بطليموس. إنّ أفلاك التدوير هي دوائر مبنية على دوائر أخرى نتخيّل أنّ الكواكبَ موصولةٌ بها وتتحرّك على طولها، مثل التُّمَيْثيلات الصغيرة في ساعة وقواقٍ ضخمة(**).

(*) وفق الاصطلاحات الحديثة في علم الفلك تُعطى تسمية الحركة المتقدّمة ـ على عكس المتراجعة ـ إلى الحركة التي تتمّ من الغرب إلى الشرق، أي بعكس عقارب الساعة عندما يُنظر لها من نجم القطب في السماء.

(**) فلك التدوير هو عبارة عن دائرة يدور وفقها الكوكب، ولكن مركزها يدور هو الآخر وفق دائرة أكبر.

وهكذا تصوّر بطليموس الكون كما لو كان ساعةً عملاقة تحتوي على أشياءٍ يتمّ دفعها وفق مساراتها ـ المرتبطة بأفلاك التدوير ـ عبر آليةٍ كبيرة مخفية شبيهة بما في الساعة ومصنوعة بأيدي الآلهة. ومع ذلك بقيت بعض الأحجيات الكبيرة من دون تفسير في نظرية بطليموس: فعلى سبيل المثال كان بريق (لمعان) كوكب الزهرة يتغيّر مع حركته عبر السماء من دون أيّ تفسيرٍ لذلك. ولكنْ في ما خلا هذه الاستثناءات فإنّ كلّ شيء آخر أمكنَت مواءمتُه مع توصيف النظرية المتضمِّن للدوائر وأفلاك التدوير لا غير. وبشكلٍ لافتٍ للنظر، تمكّنت نظرية بطليموس ـ بعد تحسيناتٍ وتنقياتٍ عليها (ندعو ذلك بـ «الضبط أو التوليف الدقيق») ـ من إعطاء تنبّؤاتٍ دقيقة نوعاً ما عن مواضعَ مستقبليةٍ للأجرام الفلكية في السماء[6].

لقد تأسّست عبر نظرية بطليموس رابطةٌ قوية بين الكائن المتناظر الأمثل والكلّي الوجود والمكوِّن الأساسي لحركة الأجرام السماوية كما طلب أرسطو ـ وهو الدائرة ـ وبين القياسات الدقيقة لحركات الكواكب. إذاً وُجد لدينا هنا «علم كونيات»، أي منظور «علمي» للكون مبنيّ أساساً على مفهوم التناظر الدوراني (وإن كان ذلك من خلال الفلك التدويري). كانت نظريةُ بطليموس مفيدةً فعلاً، كما هي النظريات الجيدة، فمن خلال تقديمها لتنبّؤاتٍ دقيقة عن مواضع الكواكب والشمس والقمر (التقويمات الفلكية) تمَّت الاستفادة

(6) قام الطلاّب الرهبان خلال العصور الوسطى بالتوليف والضبط الدقيقَين لنظرية بطليموس من أجل الحصول على تنبّؤاتٍ صحيحة بشكل مُحكَم. وقد توصّلوا على نحو عفوي إلى اختراع ما يُعرَف حديثاً باسم «تحليل فورييه»، حيث يمكن تقريب أيّ تابع رياضياتي [عند تحقيقه لبعض الشروط «الملساء»].

من خلال مجموع متسلسلة من توابع دوريّة (مثلثّية)، انظر: Emmanuel Paschos, *The Schemata of the Stars: Byzantine Astronomy from 1300 A. D.* (Singapore: World Scientific Press, 1998).

منها في مجالات الملاحة وتعيين مواعيد جني المحاصيل بالإضافة إلى التنجيم (الذي كانت ـ ولا تزال ـ له قيمة سوقية تجارية مع أنّ فائدتَه عدا عن ذلك هي أقلّ من فائدة روث الأحصنة). من ناحية جمالية قدّمت نظرية بطليموس وصفاً مرضياً للكون منسجماً مع فلسفة أرسطو، وتمّ احتضانها من قبل الكنيسة الكاثوليكية صاحبة النفوذ القوي. لقد أبرزت النظرية تناظراً مقدَّسا عبّر عن ذاته من خلال الدائرة وأظهر لنا نفسه عبر حركات الأجرام السماوية في الفضاء.

مع ذلك كانت نظرية بطليموس الأنيقة ـ «النموذج المعياري» المعتَمد خلال الألف والخمسمئة سنة الأولى بعد الميلاد، أي النظرية الكونية صاحبة الرقم القياسي في الاستمرار ـ **مخطئةً تماما**[7]!

قام نيكولاوس كوبرنيكوس (Nicolaus Copernicus) وهو عالم لاهوتٍ بولوني بتعديلٍ كامل لصورة المنظومة الشمسية عام 1530 في كتابه باللغة اللاتينية **عن ثورات المدارات السماوية** (*De*

(7) سيعترض بعض «الفتيان الحكماء» على صحة هذه الإفادة القوية، فعلى سبيل المثال إذا كان لدينا جسمٌ يدور حول جسم آخر له نفس الكتلة، فإنّ القول في هذه الحالة بأنّ أحدهما يدور في مدارٍ حول الآخر هو أمرٌ مُربِكٌ، إذ يمكن اعتبار كلٍّ منهما يدور حول الآخر. وفي الواقع لا شيء يمنع من استخدام منظومة إحداثيات متحرّكة مرتبطة بأيّ واحدٍ من هذين الجسمَين، وبالتالي وصف الحركة بدلالة هذه الإحداثيات التي تُعامِل الجسمَ الآخرَ (غير المرتبط بها) كما لو كان يحوم في مدار. وهكذا **نستطيع** القول ـ من وجهة نظر تقنية ـ إنّ الشمس تدور حول الأرض ضمن منظومة إحداثيات مرتبطة بالأرض (بالتأكيد تسمح النسبيةُ العامة لإينشتاين باستخدام أيّ منظومة إحداثيات نختارها)، ولكننا بالتأكيد لا نستطيع هنا القول إنّ الكواكب الأخرى: الزُّهرة والمرّيخ... إلخ، تدور أيضاً حول الأرض، لأنّ مداراتها ليست دائرية في منظومة الإحداثيات المرتبطة بالأرض. إذاً للدقة نقول إنه في مرجع عطالي تدور جميع أجرام المنظومة الشمسية حول مركز الثقل (الكتلة) للمنظومة الشمسية والذي يمكن اعتباره ثابتاً في المكان. يتموضع مركز المنظومة الشمسية بالقرب من مركز الشمس، لأنّ الشمس ثقيلةٌ جداً مقارنةً بالكواكب.

(*Revolutionibus Orbium Coeletium*. لقد أعاد اكتشاف تشكيل المنظومة الشمسية الضائع لأريستاركوس والذي صيغ قبل حوالي ألفَي سنة، واقترح أنّ كوكب الأرض **يدور حول محوره** ممّا يعطي الانطباع **الظاهري** بدوران الشمس والنجوم والكواكب الأخرى حول كوكبنا. إنّ الشمس هنا هي مركز كلّ شيء، وجميع الكواكب ـ بما فيها الأرض ـ تدور حولها. مثّل القمرُ حالةً خاصةً في أنه يدور حول الأرض، أما النجوم فقد كانت «ثابتةً» على مسافاتٍ بعيدةٍ جداً من «المنظومة الشمسية». أصبحت الحركتان المتقدِّمة والمتراجعة للكواكب الآن نتيجةً تنجم عن حقيقةِ دوران الأرضِ نفسها حول الشمس الذي يقتضي تغيُّراً مستمراً لنقطة مراقبتنا **بالنسبة** إلى الكواكب. وهكذا أنهت نظرية كوبرنيكوس الأفلاك التدويرية (Epicyclical) كمكوّنات أساسية في النظرية الكونية، فالنظرية الجديدة نظرية ذكية وحذقة تجعل الحركةَ المتقدّمةَ والمتراجعةَ للكواكب **أثراً ظاهرياً** وليس أثراً حقيقياً أساسياً.

لم يقُم كوبرنيكوس في الحقيقة بمناصرة نظريته كما يجب (ربّما لخوفه من الكنيسة الكاثوليكية)، فلم ينشر العملَ الذي تضمَّنها إلاّ قبيل وفاته بقليل. لقد وقف كتابه مباشرةً في وجه نصوص **الكتاب المقدّس**: خاصةً **سفر يشوع** (Joshua) حيث جعل الربُّ الشمسَ «تقف ساكنةً» في منتصف السماء ولمدة يوم كامل[8]. يوجد تنصّلٌ لافتٌ للنظر على الصفحة الخلفية لغلاف كتاب كوبرنيكوس «عن الثورات» يعلن: «هذه الأفكار هي مجرّد إنشاءاتٍ افتراضية للتنبّؤ

---

(8) تمّت بعد ذلك مواجهة غاليليو بشكلٍ صريح مع هذه الآية من **الكتاب المقدّس**، انظر على سبيل المثال: Dava Sobel, *Galileo's Daughter: A Historical Memoir of Science, Faith, and Love* (New York: Walker & Co., 1999).

بمواضع الكواكب، ويجب ألاّ تُعتبر صحيحة أو حتى ممكنة». يُعتقَد أنه تمّت إضافة هذا التنصّل بشكلٍ لا يُظهر اسمَ قائله من قبل أندرياس أوسياندر[9] (Andreas Osiander)، وهو عالم لاهوت معاصرٌ لكوبرنيكوس ومدقّق لكتابه. ومن الممكن أن يكون أوسياندر قد فعل ذلك حمايةً للأكاديميين وطلاب العلم الذين استطاعوا بذلك امتلاكَ الكتاب من دون خوفٍ من اتهامهم بالهرطقة. لا حاجة إلى القول إنّ النظرية أدّت بالفعل إلى إثارة القلاقل والبلبلة.

في نظرية كوبرنيكوس تمَّ كذلك في البداية افتراض أنّ مدارات الكواكب جميعها دائرية الشكل، ممّا أبقى على العنصر ـ المفتاح التناظري لفلسفة أرسطو. ولكنّ المرء يستطيع الآن فهم سبب تغيّر بريق ولمعان (كوكب) الزُّهرة، فهو أيضاً أثرٌ ظاهري مرتبطٌ بموضعها المداري نسبةً إلى موضع الأرض، إذ إنّها تارةً قريبةٌ منها وفي نفس الجانب بالنسبة إلى الشمس وتارةً بعيدةٌ عن الأرض وعلى الطرف الآخر نسبةً إلى موضع الشمس. فسّرت النظرية كذلك حقيقةَ وجودِ أطوارٍ لكوكب الزهرة مثل القمر (كما لاحظها غاليليو بعد ذلك من خلال مقرابه)، وهذا أمرٌ تعجز نظرية بطليموس تماماً عن تفسيره. قدّمت نظرية كوبرنيكوس منظوراً للحركة المدارية أكثرَ جماليةً وأنقى مفاهيمياً، فالكون ـ حسب هذا المنظور ـ مكانٌ يتّصف بالدقّة والحِذْق: طالما أنّ المواضعَ الظاهرةَ للأشياء تتحدّد من خلال موضع المراقب، فإنّ كلّ شيءٍ يتمّ حلّه وتفسيره بطريقةٍ ذكية. لقد فسّرت نظرية كوبرنيكوس حركةَ التقدّم والتراجع الظاهرية للكواكب، وطرحت خارجاً مفهوم الأفلاك التدويرية المعقّد.

---

(9) عن البحث التاريخي الذي أجراه أوين غينغريتش، انظر: Copernicus Christopher Reed, «The Quest,» *Harvard Magazine* (December 2003), انظر أيضاً: Owen Gingerich, *The Book Nobody Read: Chasing the Revolutions of Nicolaus Copernicus* (New York: Walker & Company, 2004).

يمكن للمرء الآن ـ من خلال المعايير الحديثة لـ «الأمور الطبيعية» ـ أن يظنّ أنَّ أيّ شخصٍ ذي عقلٍ راجح سيرفض مباشرةً نظرية بطليموس المصطنعة بأفلاكها التدويرية لصالح وصف كوبرنيكوس المعقول والاقتصادي للكون؛ ولكنّ الأمر لم يحدث سريعاً ولا بهذه الصورة. من السهل الآن ـ مع إدراكنا المتأخّر 20/20 (أي السلس) وفي عصرِ الرحلات الفضائية ـ أن نجد مجمل نظرية بطليموس وسلوك أبطالها ضمن هذا السياق التاريخي مدعاةً للضحك. لكنْ حفاظاً على الموضوعية يجب أن نذكر أنّ نموذج كوبرنيكوس بمداراته الدائرية كان **أقّل دقةً بكثير** من نظرية بطليموس في التنبّؤ بمواضع الكواكب في السماء في أزمنة مستقبلية (نقول هنا إذاً إنّ نظرية بطليموس كانت أجوَد في «ملاءمة المعطيات»؛ انظر الملاحظة الختامية 6)! لقد كان نموذج كوبرنيكوس يحتاج إلى التحسين وإلى صقل إضافي.

إنّ الوصف العلمي الصحيح لتركيبة المنظومة الشمسية كان موجوداً بشكلٍ ما ضمن نظرية كوبرنيكوس، ولكن كيف كان يمكن للمرء إثبات تلك الصحّة؟ لقد استمرّ ناشرو التقويمات الفلكية في ذلك العصر باستخدام نظرية بطليموس الأكثر دقة؛ وبذلك كانت نظرية بطليموس هي الفائزة، إذا ما تمّ الحكم على أساس الميزات الموضوعية لدقّتها. الأكثر من ذلك فقد رفض القادة الدينيّون نظريةَ كوبرنيكوس ـ التي لا تعتمد الأرض مركزاً ولا فلسفة أرسطو مبدأً توجيهياً ـ برمّتها، ووصل بهم الأمر في النهاية إلى اعتبار تعليمها نوعاً من الإلحاد والهرطقة يُعاقَب عليه بالموت. تتضمّن نظرية كوبرنيكوس أموراً دقيقة وحذقة تتعلّق بالمنظور الذي يخدع المراقبَ ويقوده إلى «رؤية» الأفلاك التدويرية التي ليست في الحقيقة موجودة، وقد يكون ذلك قد بدا شيئاً يدعو إلى القلق بالنسبة إلى القادة الدينيين المعنيين بالدور الذي يؤديه الشيطان في تلويث نقاء الإيمان. في نهاية المطاف

ما أراده أولئك القادة كان الإبقاءَ على سلطتهم الحاكمة المركزية ورفضَ أيّ هجومٍ على معلّمهم الرئيس ـ أرسطو ـ وعلى تناظر الدائرة المقدّس.

نلتقي هنا بجيوردانو برونو (Giordano Bruno) الذي فُتن بالأناقة العقلانية الواضحة وبالجمال المنطقي لنظرية كوبرنيكوس التي تخلّصت بطريقةٍ ديمقراطية جداً من الموقع المميَّز والمفضَّل للأرض في مركز الكون. أعلن برونو على نحو واسع وبشكلٍ صاخب أنّ المنظومة الشمسية نفسَها بكاملها ليست إلاّ واحدةً من منظوماتٍ شمسية عديدة في كون أكبر. كان كونُ برونو إذاً مليئاً بمنظوماتٍ متشابهةٍ تحوم وتغطّي فعلياً فراغاً لانهائياً. وذهب برونو إلى أبعد من ذلك، فطرح إمكانيةَ وجود عوالمَ أخرى تقطنها كائناتٌ تساوينا ـ أو حتى تتغلّب علينا ـ في الذكاء وتعيش بعيداً في أرجاء الكون. بطريقةٍ ما كان برونو عالمَ الكونيات الحديثة الأولَ الذي تنبّأ بالكون الشاسع **المتجانس والمتناظر كروياً** الذي اعتمده علم الكونيات الحديث، وذلك من خلال تأكيده على أنّه لا وجودَ في الحقيقة لأيّ مركزٍ أو اتجاهٍ مفضّل في كلّ أرجاء الكون. تمّت محاكمة برونو ـ وغيره من المنشقّين ـ على هذه التجديفات في محكمة التفتيش، وتمّ حرقه في النهاية على الأوتاد سنة 1600.

يظهر الآن يوهان كبلر في القصة. كان كبلر مقتنعاً أشدّ الاقتناع بأنّ نظرية كوبرنيكوس هي التي تصف التشكيلةَ الصحيحة للمنظومة الشمسية. وفي نفس الوقت تقريباً الذي دفع برونو حياتَه فيه ثمناً لاعتقاداته، شرع كبلر بمعالجة مسألة التوفيق بين الصعوبات الموجودة في نظرية كوبرنيكوس وبين المعطيات الواقعية عن حركات الكواكب. لقد آمن أنه في حال استطاعته معرفةَ سببِ عدمِ إعطاء نموذج كوبرنيكوس لتنبّؤاتٍ صحيحة، وفي حال قدرته على معالجة ذلك، فإنه سيكون قد اكتشف بنيةً تناظرية جديدةً للكون. كانت لدى

كبلر إذاً تصوّرات وأفكارٌ مبلورة مسبقاً، ولكنه رغم هذا برهن على أمانته العلمية واستقامته الفكرية. توفَّر لكبلر الحقّ في الاطّلاع على أكثر القياسات الفلكية دقةً في ذلك العصر، وذلك بسبب علاقته مع الفلكي تيكو براهي (Tycho Brahe) ذي الشخصية الصعبة ـ لكن الاجتماعية ـ الذي عمل كبلر مساعداً علمياً له في ما مضى. ما ندين به لكبلر بشكل خاص هو نزاهته العلمية الرائعة ومثابرته الدائمة، فلقد كان بحقّ بطلَ الحقيقة العلمية. كان كبلر يبحث عن تفسيرٍ صحيحٍ تماماً لحركة الكواكب ـ يوائم بالضبط المعطيات التجريبية ـ ومبنيٍّ على أساس نظرية كوبرنيكوس، بغضّ النظر عمّا إذا توافق ما يبحث عنه في النهاية مع ميوله الفلسفية أم لا.

لاحظ كبلر أولاً أنّ المركز الهندسي لمدار الأرض لم يكن الشمس بل نقطةً أخرى في الفضاء تفصلها مسافةٌ عنها. ركّز بعد ذلك اهتمامَه وجهودَه على المسألة المحيِّرة لحركة كوكب المريخ. أكّد كبلر أولاً أنّ حركة هذا الكوكب مستوية، وإن كان مستوي الحركة يميل بحوالي الدرجتين عن مستوي حركة الأرض. وكان قد تَبيَّن من خلال القياسات التفصيلية والدقيقة لتيكو براهي أنّ حركةَ المريخ بعيدةٌ بشكلٍ واضح عن حركةٍ في مدارٍ دائري مركزُه الشمس. فاكتشف كبلرُ أنّ الشكل الهندسي الصحيح للمدار لم يكن دائرةً بل قطعاً ناقصاً، وبرهن لاحقاً على أنّ جميع مدارات الكواكب في نظرية كوبرنيكوس هي قطوع ناقصة. وأخيراً أثبت كبلر أنّ سرعة الكوكب خلال حركته المدارية ليست ثابتةً بل إنها تتغيّر: وبالتالي تَبيَّن أن فكرةً أخرى لأرسطو كانت خاطئة. واكتشفَ كبلر العلاقةَ الصحيحة التي تربط بين سرعة الكوكب وموضعه في المدار. كانت هذه الاكتشافات ـ وهي أعمال تدلّ على القوة والألمعية للنهج المنطقي والبحث العلمي ـ قائمةً على الملاحظة، وغدت حقائقَ لا يمكن دحضها تقتضيها منظومةُ كوبرنيكوس الشمسية، هذا بالرغم من

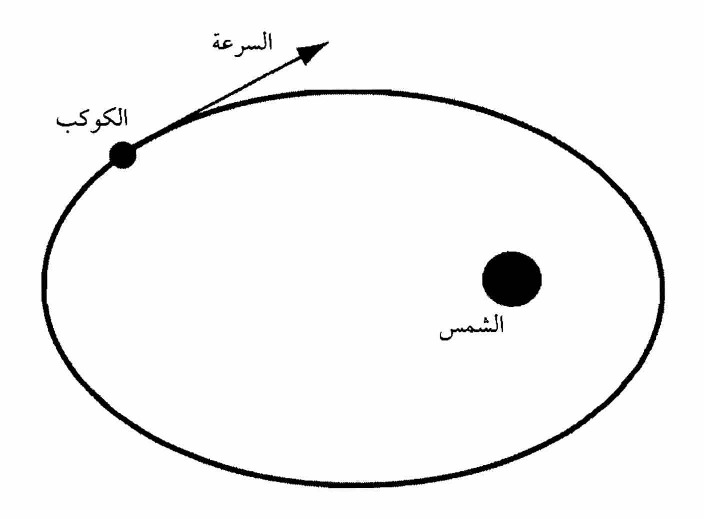
أنّ نتيجةَ الأعمال لم تكن مرضية لكبلر الذي كان يبحث عن تناظرات عميقة مقدّسة وعن كمالٍ رياضياتي فيثاغورسي ضمن القوانين التي تحكم حركة الكواكب. مع ذلك كانت الحقائق هنا تؤكِّد أنه: **علينا التخلّي عن التناظر الدائري إذا ما أردنا للكواكب أن تدور حول الشمس في المنظومة الشمسية.**

لابدّ هنا من التنبيه إلى تعارضِ نظرية بطليموس في ذلك الوقت تماماً مع معطيات مراقبات تيكو الدقيقة. على كلّ حال اكتشف كبلر في النهاية مجموعة قوانينه الثلاثة التي تعرِّف تماماً حركة الكواكب في مداراتها، ونشر في عامَي 1609 و1619 سلسلةَ والاعتبارات التي قادته إلى اكتشافاته. بالنسبة إلى القانون الأول فقد استنتج كبلر أنّ المدار الكوكبي عبارة عن قطع ناقص تقع الشمس في أحد محرقيه (انظر الشكل 11)، وليس دائرةً. استنتج كبلر كذلك صيغةً رياضياتية دقيقةً تحكم الزمنَ اللازمَ في الحركة المدارية لإتمامِ أيّ قسم من المدار، ويُمثّل «قانون كبلر الثاني» هذا اكتشافَ مصونية الاندفاع الزاوي (الذي ناقشناه في الفصل السابق). وأخيراً وجد كبلر أن دور الحركة المدارية[*] T مرتبطٌ بسعة المدار R وقياسه من خلال العلاقة الرياضياتية «T^2 متناسبٌ طرداً مع R^3»، حيث ثابت التناسب هو نفسه بالنسبة إلى جميع المدارات الكوكبية[10]. وعَبْر هذه القوانين الثلاثة يتحدّد كامل مخطّط حركة الكواكب بالتفصيل. أعطت الآن تعديلات كبلر والخواصُّ المميِّزةُ للمدارات في نظرية

(*) أي الزمن اللازم لإتمام دورة واحدة.

(10) بشكل مختصر تنصّ قوانين كبلر على ما يلي: (1) إنّ مدارات الكواكب هي قطوع ناقصة بحيث تقع الشمس في أحد محرقَي القطع. و(2) يمسح الخط المستقيم الواصل بين الكوكب والشمس مساحاتٍ متساويةً خلال فترات زمنية متساوية (يكافئ هذا الأمرُ التصريحَ القائل بمصونية الاندفاع الزاوي). و(3) لدينا $T^2 = KR^3$، حيث T الدور المداري (مقدَّراً بالسنين) وR نصف القطر الكبير للقطع الناقص (مقدَّراً بالوحدات الفلكية)، أمّا الثابت K فهو نفسه من أجل جميع الكواكب في المنظومة الشمسية. =

كوبرنيكوس توافقاً تاماً مع أكثر المراقَبات والملاحظات الفلكية دقةً، وغدت بذلك نظرية كوبرنيكوس قادرةً على التنبّؤ بكفاءة تامة، بينما لم تكن نظرية بطليموس تتمتع بهذه الميزة. استطاع بعد ذلك ناشرو التقويمات الفلكية استعمالَ المنظومة الشمسية لكوبرنيكوس ـ كبلر بوثوقية أكبر من مخطّطات بطليموس. إذاً من وجهةِ النظر العلمية صارت نظرية بطليموس الآن في عداد الأموات.



الشكل 11: المدار الكوكبي القطع ـ ناقصي حيث تقع الشمس في أحد محرقَي القطع الناقص؛ تكون السرعة اللحظية للكوكب مماسّةً للقطع الناقص.

= هناك كثيرٌ من المواقع الإلكترونية توضّح قوانين كبلر (وبعضها يقدّم وسائل للمساعدة بواسطة الأفلام). اكتب قوانين كبلر (Kepler's Laws) في محرّك البحث غوغل، أو اذهب مثلاً إلى: www.phy.ntnu.edu.tw، أو موقع بيل درينون (Bill Drennon) قوانين كبلر مع وسائل مساعدة بالأفلام www.cvc.org: (Kepler's Laws with Animation)
(جميع المواقع وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 2 حزيران/ يونيو 2004).

يُعبِّر القطع الناقص عن شكل رياضياتي معرَّفٍ تماماً، يشبه إلى حدّ ما دائرةً «مضغوطةً» أو غير مثالية. من الواضح أنه كان علينا التخلي عن مفهوم التناظر الأساسي والموجِّه لأرسطو ـ كما تُعبِّر عنه الدائرة ـ من أجل إيجاد تفسيرٍ صحيحٍ لسلوك الكون. لقد كشف كبلر عن مجموعة كاملة وصحيحة من القواعد التي تصف حركة الكواكب بشكل صائب، فماذا حدث للتناظر؟ بدا أنّ التناظر غدا الآن هامشياً أو في أحسن الأحوال تقريباً جيّداً لا غير، إذ أضحت الدائرة المثالية منضغطةً ينجم عنها القطع الناقص. مع ذلك كانت قوانين كبلر صحيحةً بشكلٍ تامّ، ممّا هيّأ المنصّةَ من أجل إلقاء مجموعةٍ تاليةٍ من الأسئلة. فقد كان مختبئاً خلف قوانين كبلر لحركة الكواكب نوعٌ جديد من التناظر يربض ساكناً في مستوى أعمق لجوهر حقائق الطبيعة.

نلاحظ أنّ وصف كبلر للمنظومة الشمسية كان **نظرية ظواهرية.** إنّ النظريات الظواهرية شائعةٌ في العلوم، وهي مجموعات من القواعد تصف ظاهرةً معيّنة ـ أو موضوعَ دراسةٍ ما ـ بشكلٍ صحيح، ولكنها غالباً لا تضع روابطَ عميقة تربط هذه الظاهرة بغيرها من الظواهر العلمية. مع ذلك تساعد النظرياتُ الظواهرية على تقدّم العلم، لأنها تختزل مجملَ المعطيات التي تمّ الحصول عليها من مراقباتٍ وملاحظاتٍ عديدة في مجموعةٍ واحدة مُقتصَدة تضمّ بضع قواعد لا غير، وتكمن الخطوةُ التالية بعد ذلك في تفسير هذه المجموعة من القواعد الظواهرية. لكنْ تاريخياً انطوى قبولُ نظرية كبلر في أيامه على مخاطرَ جمّة بسبب تداخلها مع الخطوط السياسية والدينية وتعارضِها مع قوانين الكنيسة. فكما رأينا قرَّرت الكنيسةُ الكاثوليكية في ذلك العهد أنّ أيَّ وجهة نظر مخالفةٍ لنظرية بطليموس القديمة هي بدعة وهرطقة يعاقَب عليها بأشدّ أنواع التعذيب و/أو

الإعدام. ولقد عَنَت الكنيسةُ ذلك بالفعل، حيث كان مصير برونو وغيره جاثماً في مخيّلة كثيرٍ من العاملين بالعلم في بداية القرن السابع عشر.

ملاحظة العطالة

بقي سؤالٌ علمي واحد - بدا عسيراً على الحلّ - مخيّماً فوق نظرية كوبرنيكوس عن المنظومة الشمسية بعد إدخال تعديلات وتحسينات كبلر عليها، وهو: ما الذي يجعل الكواكبَ تدور في مداراتها؟ يبدو أن القوةَ المؤثّرةَ على الكوكب تسيّره بأن **تدفعه (تدفعه)** في اتجاه حركته، لذا نقول إنّ **اتجاه الحركة مماسٌ للمدار.** هذه فكرةٌ تمّت استعارتها من الإغريق القدماء بسبب شعورهم بالتعب لدرجة التأوّه أثناء جرّهم أو دفعهم للعربات المحمَّلة بقوارير زيت الزيتون في عالَم يهيمن عليه الاحتكاك. كان يبدو من الواضح أنه لابدّ للكواكب في غياب ما «يدفعها» أن تتوقّف بعد برهة وتصبح ساكنة، كما يحدث مع العربات التي تجرّها البغال، أو الأحجار التي نرفعها إلى أعلى بناءٍ ما، وغيرها من الأمور المشابهة. للأشياء «مَيلٌ ونزعة طبيعية» نحو السكون: هكذا قال أرسطو. لم تكن عند كبلر إجابةٌ أفضلُ عن السؤال عمّا يحرّك الكواكب، ويقال غالباً إنه كان يجيب: «تخفق الملائكةُ أجنحتَها وتدفع الكواكب». مع ذلك استنبط كبلر في الواقع نظريةً معقّدة ومبدعة لدوّامات صادرة عن الشمس، تقوم بدورٍ مزدوج في دفعها للكواكب - كما لو كانت تقوم بكنسها - ثم في إبقاء حركة هذه الكواكب ضمن مداراتها القطع - ناقصية[11].

---

(11) انظر: Koestler, *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*, pp. 446-448.

لقد أُدير مفتاحُ مستقبل العلوم عند هذا السؤال، وكان غاليليو الشخصَ الذي حرّر العقل البشري أخيراً من عالَم الفلاسفة الإغريق الذي هيمن عليه الاحتكاك. لقد كان غاليليو عالِماً مبدعاً استثنائياً، وربّما كان الأعظمَ بين من عاش من العلماء. اكتشف غاليليو أموراً كثيرة غيّرت جذرياً من نظرتنا إلى الكون، فقد كان ـ في حقيقة الأمر ـ أولَ من راقب السماء بمقرابٍ ـ تلسكوب قوتّه التكبيرية 20 مرّة قام هو بصنعه في مخبره عامَ 1609 في جامعة بادفا (Padua) في جمهورية البندقية (Venetian Republic)، في إيطاليا اليوم. وقد كان يجمع في مواهبه الشخصية كلا الناحيتين التجريبية والنظرية على السواء، فمن الجهة الأولى كان فائقَ المهارة في صنع أدواتٍ تتصّف بالدقّة الضرورية للعلم وأجرى بها عدداً من الملاحَظات والمراقَبات التفصيلية والمجهِدة، ومن الجهة الأخرى كان نظرياً عبقرياً يفكّر دوماً كيف يربط هذه الملاحظات بمبادئَ شمولية أعمق. اكتشف غاليليو أنّ في القمر جبالاً وفوهاتٍ بركانيةً، وأنّ للمشتري أقماراً، وأنّ الشمس تدور حول محورها ولها بقعٌ شمسية، أما كوكب زُحل فله حلقات، بينما كوكب الزُّهرة مغطّى بغيوم وله أطوارٌ مثل القمر: تماماً كما تنبّأت نظرية كوبرنيكوس. من المذهل ما كانت الطبيعة تخبّئه لأوّلِ طفلٍ في العِمارة توفرّت عنده أداةٌ علميةٌ جديدةٌ وقوية.

ومع كلّ ذلك لا شيءَ أكثرَ أهميةً من تحليل غاليليو لمراقَباته العديدة عن الحركة. لقد أجرى سلسلةً من التجارب المتضمِّنة لأجسام متحرّكة على سطوح ملساء لا احتكاك فيها، وتجاربَ على النوّاسات وعلى أجسام يتمّ إسقاطها من علو أو يتمّ تحريكها على مستوياتٍ مائلة نحو الأعلى أو الأسفل. وكما قلنا كان غاليليو أوّل من لاحظ العطالة وانكبّ على دراستها بشكل منهجي، إذ عزل

الاحتكاكَ وأزاله من مراقَباتِه عن الحركة ليكتشف أنّ العطالة ظلّت باقية. قام غاليليو في الواقع بالدراسة الدقيقة لملاحظاتِه عن الحركة مع التمعّن حتى في التفاصيل الصغيرة، فقاده ذلك إلى اكتشاف مبدأ العطالة.

ندرك من مبدأ العطالة أنه **لا شيء** يسيّر أو يدفع الكواكب وهي تحوم في مداراتها: بكل بساطة الكواكب تظلّ في حالةِ حركةٍ سرمدية بفضل العطالة. **لا وجودَ** للاحتكاك في الفضاء الفارغ، وهذا الاحتكاكُ هو ما يُخفي ميلَ الأجسام ونزعتَها إلى الاستمرار في حركتها الأبدية بسرعةٍ ثابتة وباتجاه ثابت لا يتغيّر في المكان. يمثّل الاحتكاكُ القوّةَ الشائعة التي تغيّر الحالةَ الحركية للعربة الثقيلة المحمَّلة بجرار زيت الزيتون فتسبّب إيقافَها، فلو أزلنا الاحتكاك، فسنجِدُ أنّ العربةَ سوف تستمرّ إلى الأبد في حركةٍ منتظمة على خط مستقيم.

ولكنْ ما يتنبّأ به مبدأ العطالة هو أنّ الكواكب ستتحرّك وفق خطوط مستقيمة ما لم تؤثر عليها قوةٌ ما تسبّب تغييراً لاتجاه الحركة، تكون ـ في حالتنا هنا ـ قوّةَ جرٍّ تجرّ الكواكبَ نحو مركز المدارات التي تدور فيها. على سبيل المثال، إذا ربطْنا حجراً بنهاية خيطٍ ثم أدرْنا الخيطَ بحركة دائرية سريعة، فإنّ قوةَ شدّ الخيط (توتّره) سوف تجرّ الحجرَ وتجعله يقوم بهذه الحركة الدائرية، ويكون منحى القوة متجهاً نحو مركز «المدار الحركيّ» للحجر. إذا انقطع الخيطُ فإنّ الحجرَ سوف يطير في الهواء بخطّ مستقيم مماسٍّ للدائرة الأصلية خاضعاً بذلك إلى مبدأ العطالة. وحالُ الكواكب شبيه بحال الحجر، فما هي القوة التي تجرّ الكواكب نحو مراكز مداراتها؟ كان يُطلَب من **القوّة** في عالَم الإغريق ـ الذي يهيمن الاحتكاك على

تجارب نقل العربات فيه ـ أن تولِّد الحركةَ، بينما هي في الحقيقة تستلزم **تغييراً للحركة** لا غير: إنّ القوة ضرورية لكي **تبدأَ** الحركةُ أو **تتوقّف**، أو لكي تتغيَّر الحالة الحركية للجسم من خلال تغيير اتجاه حركته أو قيمة سرعته. يُدعى التغيّر في السرعة باسم **التسارع**. إنّ قوةَ الاحتكاك موجودةٌ دوماً في حياتنا اليومية لإيقاف الحركة، ولكنها غائبةٌ في الفضاء الخاوي حيث تتحرّك الكواكب. فالاحتكاك إذاً نتيجةٌ لتعقيد العالَم حولنا، ولكن بمجرّد إدراك كُنْهِه وأخذه بعين الاعتبار، فإنّ صلاحيةَ مبدأ العطالة تبقى قائمة في جميع أرجاء الكون وخلال أزمنته المختلفة.

بشكلٍ مفاجئ مَثَل غاليليو أمام محكمة التفتيش في سنة 1633، وتمَّ تهديده بالتعذيب والموت، فأُرغم راكعاً على ركبتيه والأغلالُ في يديه أن يُنكِر اعتقادَه بنظرية كوبرنيكوس وكذلك جميعَ المراقبات الفلكية التي جمعها بتلسكوبه التي رفض المُدَّعون العامّون إلقاءَ حتى نظرةٍ عليها. وفي النهاية صدر الحكم على غاليليو بالسجن (الإقامة الجبرية في الواقع) لبقية حياته.

نتمنى بالتأكيد أن تكون مثلُ تلك الأزمنة قد ولّت إلى غير رجعة، ولكننا لسنا على يقينٍ من ذلك.

اجتماع التناظر والعطالة مع قوانين الفيزياء

يحتوي مبدأ العطالة على التناظر، فالأخير ـ كما رأينا ـ يعبّر عن التكافؤ بين الأشياء، ومبدأ العطالة يشير إلى نوع من التكافؤ هو تكافؤ جميع حالات الحركة المنتظمة. يعني ذلك أنّ أيَّ حالةِ حركةٍ منتظمةٍ لجسم ما تبقى نفسها ما لم يتدخّل أمرٌ ما يغيّر هذه الحالة الحركية، أي ـ بعبارة أخرى ـ ما لم تؤثّر قوةٌ ما على الجسم.

يمكننا الآن إعادةُ صياغةِ المبدأ بشكلٍ أكثر عمقاً. إنّ جميع حالات الحركة المنتظمة في الحقيقة متكافئةٌ مع بعضها بعضاً، وهذا نوعٌ من التناظر في الطبيعة! يُدعى ذلك بـ**اللاتغيّر (الصمود) الغاليليّ** (أو **نسبية غاليليو** أو **تناظر غاليليو**): **جميع حالات الحركة المنتظمة متكافئةٌ في ما بينها بالنسبة إلى وصف الظواهر الفيزيائية**. ماذا نعني بعبارة: «جميع حالات الحركة متكافئة في ما بينها»؟ إذا كنتُ واقفاً هنا وأنتَ متحرّك هناك فهل نحن في نفس الحالة الحركية؟ **ليس** هذا هو المقصودُ فعلاً من العبارة.

ما تعنيه العبارة فعلاً هو أنّ القوانين الفيزيائية تبقى نفسَها تماماً بالنسبة إلى كلّ المراقبين المتحرّكين حركةً منتظمة، رغم أنّ كلَّ واحدٍ منهم في حالةِ حركةٍ خاصة به. وهكذا تكون الحركة المنتظمة هي تناظر لقوانين الفيزياء، فإذا كان مراقبٌ ما يتحرّك - مع مخبره - بحركة منتظمة في المكان، فإنّ قوانين الفيزياء التي سيطبّقها في مخبره لن تكون مختلفةً عنها في حالة مراقبٍ متجمّد في مكانه هو ومخبره. في الحقيقة لا يوجد معنى مطلق لعبارات من أمثال «متجمّد في مكانه» أو «يتحرّك حركة منتظمة في المكان»، لأنّ المراقِبَ الذي أراه متحرّكاً بانتظام يرى نفسَه متجمّداً في مكانه، وبالمقابل هو يراني أنا متحرّكاً بحركة منتظمة في الاتجاه المعاكس. لا توجد طريقة لتعريفِ أيٍّ من المراقبَين يتحرّك بشكل مطلق في الفضاء، ولا يمكن تحديدُ أكثر من **حركتهما النسبية**. سيجد كلا المراقبَين ضمن مخبرَيهما أنّ قوانين الفيزياء التي يستعملانها متطابقة. ولدينا تسميةٌ خاصةٌ بحالات الحركة المنتظمة لمخابرَ افتراضية هي تسميةُ **جمل المقارنة (المراجع أو المعالِم) العطالية**.

يمكن أن نرى كيفيةَ تضمّن التناظر المذكور لمبدأ العطالة. إذا

قبلنا بأنّ كائناً ما بقي ساكناً في مرجعي العطالي بسبب غياب أيّ قوة مؤثّرةٍ عليه، فإنه علينا قبولُ أنّ كائناً آخرَ ما يمكن أن يبقى ساكناً في مرجع سُهَير العطالي (المكافئ لمرجعي) مع غياب القوى التي تؤثّر عليه، ولكن سُهَير في حركة منتظمة بالنسبة إلي، وكذلك سيكون الجسم الساكن بالنسبة إليها. وبالتالي نصل بشكل منطقي إلى مبدأ العطالة: في غياب القوى المؤثّرة يكون الجسم ساكناً أو متحركاً حركة منتظمة، وبتعبيرٍ آخر أيّ كائنٍ في حالةِ حركةٍ منتظمة (أي متحرّكٍ بسرعة ثابتة كالجسم في مرجع سُهَير العطالي بالنسبة إلي، أو ساكنٍ كالجسم الأول بالنسبة إلي أيضاً) يجب أن يستمرّ في حركته هذه ما لم نؤثّر عليه بقوة ما.

يمكن أن تكونَ قد لاحظت لفظَ «بالنسبة إلى» المتكرّر في المقطع السابق. في الواقع إن اللاتغيّر الغاليليّ هو ما يُعرَف اليوم باسم **مبدأ النسبية**. بعد ذلك ـ وعندما دخل إينشتاين إلى اللعبة ـ أضحى المبدأُ أكثر عمقاً، إذ ثبت في النهاية أننا لا نحتاج حتى إلى الإصرار على عبارةِ «حركة منتظمة» متى ما رغبنا بالتكلّم عن قوانين الفيزياء بشكلٍ أعمّ. وقد قادنا ذلك إلى نظرية إينشتاين في النسبية العامة.

وهكذا يمكننا التفكير بمبدأ العطالة على أنّه نتيجةٌ لتكافؤ القوانين الفيزيائية في جميع جمل المقارنة العطالية، وهو ـ بهذه الطريقة ـ تناظرٌ لقوانين الفيزياء. هذا هو الجوهر الحقيقي للمبدأ.

قوانين نيوتن في الحركة

كما رأينا، كان الناس قبل غاليليو يظنّون أن القوة **تُنتج** الحركة، وأنه بغياب القوة تغيب الحركة. ولكننا رأينا أن هذا الظنّ كان خاطئاً. تتضمّن الحركة العطالية ـ أي الحركة بسرعة ثابتة ـ غياباً لأيّ قوّة

تؤثر على الجسم، مثلها في ذلك مثل حالة السكون. بطبيعة الحال، إننا نحتاج إلى «قوى» من أجل تغيير الحالة الحركية لجسمٍ ما، ولكن ما هي القوة، وماذا تفعل على وجه التحديد؟

مضى وقتٌ طويل بعد غاليليو قبل أن يأتيَ إسحق نيوتن (Isaac Newton) ويحدّد بدقة ما هي القوة: تساوي القوةُ حاصلَ جداء الكتلة بالتسارع، أو كما تُكتب في إحدى أشهر المعادلات على مرّ التاريخ $\vec{F} = m\vec{a}$. لا ينصّ ذلك على أن القوةَ تُنتج الحركة، لأن الحركةَ بديهياً هي السرعة كما تخيّلها الإغريق، بل تُنتج القوةُ بالأحرى **تسارعاً**، والتسارع هو **معدّل تغيّر السرعة** (في وحدة الزمن). يعبّر التسارعُ عن معدّل تغيُّرٍ يكون مستمراً من مرجع عطالي إلى آخر. لنلاحظ أنّ التسارع من حيث كونه المعدّل الزمني لتغيّر السرعة يجب أن يكون مقداراً شعاعياً له سعةٌ (طويلة) واتجاهٌ في المكان، وبالتالي يقتضي قانونُ نيوتن أنّ القوة $\vec{F}$ بدورها يجب أن تكون شعاعاً بطويلةٍ واتجاهٍ في المكان.

صاغ نيوتن قوانين الطبيعة التي تعرِّف الفيزياء التقليدية، عارضاً أولاً القوانين الثلاثة الأولى للحركة والقوى:

1 ـ يبقى الجسم الساكن أو المتحرّك بحركة منتظمة في حالة السكون أو حالة الحركة المنتظمة، ما لم نؤثّر عليه بقوة ما.

2 ـ تولّد القوة $\vec{F}$ المؤثِّرة على جسمٍ كتلته m تسارعاً $\vec{a}$ يتحدّد من خلال المعادلة $\vec{F} = m\vec{a}$.

3 ـ إذا أثّر جسم A على جسم B بقوة $\vec{F}_{AB}$، فإنّ الجسم B سيؤثّر على الجسم A بقوة $\vec{F}_{BA} = - \vec{F}_{AB}$ (أي إنّ $\vec{F}_{BA}$ تشير إلى الاتجاه المعاكس لـ $\vec{F}_{AB}$ ولكن لها نفس الطويلة، وتُدعى بقوة «ردّ الفعل»).

إنّ القانون الأول هو إعادةٌ لمبدأ العطالة الذي تطوّرت أهميته خلال السنين الفاصلة بين غاليليو ونيوتن. ولسنا متأكّدين تماماً مِن هوية مَن صاغه أولاً بهذا الشكل بالضبط: يمكن أن يكون غاليليو (إيطالي) أو نيوتن (إنجليزي) أو رينيه ديكارت (René Descartes) (فرنسي) و/أو أشخاصاً آخرين[12]. مع ذلك نجد في زمن نيوتن أن فهماً كاملاً للعلاقة المتبادَلة بين العطالة والحركة والقوى قد تمّ إنجازُه وصقلُه، بحيث وصل إلى مستوىً أساسي يسمح بوصف جميع الظواهر التي كانت قابلةً للخضوع إلى التجربة في ذلك العصر. يُعدّ هذا الأمر اختزالاً كبيراً لجميع الظواهر في الطبيعة ضمن بضعة قوانين بسيطة للفيزياء.

يُدعى قانون نيوتن الثاني عادةً باسم «معادلة الحركة». وانطلاقاً من قانون نيوتن الثاني في الحركة هذا، أصبح بإمكاننا عندما نعرف كتلة الجسيم المعني ومقدار القوة التي تؤثّر عليه، أن نحسب التغيّر في الحركة المنتظمة (أو السكون) لذلك الجسيم، وأن نحدّد حركته التالية تماماً! هذه هي قوة الفيزياء الحقيقية: القدرة على التنبّؤ الأكيد بنتيجة حادثةٍ ما. هناك قوى كثيرة في الفيزياء وبعضُها ذات صيغ معرَّفة بشكل جيد، ولكن من خلال هذا القانون الوحيد يمكننا تحديد مجمل الحركات التي تُنتجها كلُّ القوى.

أما قانون نيوتن الثالث فهو في الواقع نتيجةٌ لعدم التغيّر الانسحابي في قوانين الفيزياء، وهو يؤدي إلى مصونية الاندفاع (كما رأينا سابقاً). يمثّل القانونُ كذلك صلةً مباشرة مع نظرية نوثر (كما سنرى لاحقاً).

---

(12) يمكنك أن تجد سرداً عن حياة نيوتن ومعاصريه في: Will Durnat and Ariel Durant, *The Story of Civilization* (New York: Simon & Schuster, 1983), vol. 7: *The Age of Reason Begins*, vol. 8: *The Age of Louis XIV*.

التسارع

لنتناول مفهوم التسارع بشيءٍ من التفصيل، فهو يسبّب ـ كمفهوم القوة ـ إرباكاً وتشويشاً بالنسبة إلى كثير من الناس. يمكننا أن نتكلّم عن التسارع من دون ذكر القوة. إنّ التسارع ببساطة هو **تغيّر السرعة مع الزمن**. وحيث إنّ السرعةَ هي المعدّل الزمني للمسافة المقطوعة، فإنّ التسارع هو المعدّل الزمني لتغيّر المعدّل الزمني للمسافة المقطوعة. يساوي قانون نيوتن في الحركة بين اتجاه وشدة شعاع القوة المؤثّرة على الجسم وبينهما في شعاع تسارعِ الجسم. إذا انعدمت القوةُ المؤثرة على الجسم $\vec{F} = \vec{0}$ انعدم كذلك التسارع، ولن يعانيَ الجسم عندها أيَّ تسارع. يعني ذلك أن سرعة الجسم $\vec{v}$ لا تتغيّر مع الزمن، أي تبقى ثابتة؛ نعرّف هذه الحركة على أنها حركة عطالية.

ناقشنا سابقاً حالة السيارة على الطريق العام التي تسير بسرعة 30 متراً في الثانية (أو م\ثا اختصاراً؛ وهي تكافئ حوالي 60 ميلاً في الساعة). لنفترض أننا رفعنا قدمنا عن دوّاسة البنزين (المسرِّع) وتركنا السيارة تسير وحدها، ثم قسنا ـ بالثواني ـ الفترةَ الزمنية التي استغرقتها السيارة لتتراجع سرعتها إلى 25m/s (50 ميلاً في الساعة) فوجدنا أنه لزم 10 ثوانٍ لإتمام هذا التغيير في السرعة. خلال هذه الفترة كانت السيارة متسارعة، ولكن التسارع كان بالطبع متجهاً بالاتجاه المعاكس لسرعة السيارة: لقد كانت السيارة **تتباطأ** أو تخفّف من سرعتها (التباطؤ هو مجرّد تسارع بقيمةٍ سالبة). يساوي التسارع هنا حاصل قسمة القيمة **النهائية** للسرعة (25 m/s) منقوصةً منها القيمةُ **البدائيةُ** للسرعة (30 m/s) على طول الفترة الزمنية (10 ثوان)، أي $0,5\ m/s^2 = 10\ /(30 - 25)$، ممّا يبيّن أنّ وحدة التسارع هي **وحدة الطول مقسومةً على مربّع وحدة الزمن**. وكحال السرعة يجب أن يكون التسارع مقداراً شعاعياً، وهو يشير في مثالنا هنا إمّا نحو نفس اتجاه شعاع السرعة في حال كانت قيمته موجبةً

(موافقةً للحالة التي نزيد فيها السرعة)، أو نحو الاتجاه المعاكس (عندما نخفّف السرعة أي عندما نبطِّئ حركتنا).

يمكننا كذلك إجراء تجربة أخرى (جذّابة بالنسبة إلى المراهقين الشباب): نقيس كم يلزمنا من الوقت لجعل سيارتنا الساكنة تصل إلى سرعة 60 ميلاً في الساعة (30 m/s). يجب إجراء هذه التجربة بحذر وفي مكان آمن مفتوح، ومن قِبَل سائق متمرّس. ببساطة ما علينا إلاّ أن «ندوس على دوّاسة البنزين إلى آخرها»، ثم نقيس عدد الثواني التي تستغرقها السيارة للوصول إلى سرعة 60 ميلاً في الساعة. من أجل سيارة نموذجية صغيرة بأربع اسطوانات، نجد أننا نحتاج تقريباً لـ 8 ثوانٍ، وبالتالي نجد أن تسارع السيارة يبلغ تقريباً $3,8 m/s^2$ (أي 30 متراً في الثانية مقسومةً على 8 ثوانٍ).

لنتخيّل الآن أننا رمينا جسماً من علو وراقبنا كيفية سقوطه. سنجد أنّ الجسم يتسارع نحو سطح الأرض بقيمة 1 «g»، أي تقريباً بمعدّلِ تسارعٍ مساوٍ لـ $10 m/s^2$. (من الممتع تصميم تجربة لقياس g، ويمكن العثور على أمثلة عديدة عن ذلك في الإنترنيت). وهكذا تستطيع السيارة في مثالنا أن تتسارعَ بقيمةٍ تقارب 38 في المئة من قيمة g. يستطيع كثيرٌ من السيارات (سيارات الشرطة مثلاً) تحقيقَ تسارعٍ أكبر من هذا بكثير، ومع ذلك يبقى هذا التسارع «مريحاً» ولا تنجمُ عن السير به لفترةٍ زمنية ممتدةٍ وطويلةٍ آثارٌ جانبية ضارّة بالنسبة إلى أغلب الناس (إلاّ إذا اصطدموا بسيارة أخرى).

إليك الآن سؤالٌ مثير للاهتمام. تخيّلْ لو أننا صنعنا قطاراً فائقاً يتسارع باستمرار بمعدّلٍ مريحٍ يبلغ مثلاً 0,5 g ـ أي $5m/s^2$ ـ بعد مغادرته لمدينة شيكاغو وحتى منتصف المسافة تقريباً إلى مدينة نيويورك، ثم عند الحدود بين ولايتَي أوهايو (Ohio) وبنسلفانيا (Pennsylvania) يعكس القطارُ جهةَ تسارعه ليتباطأَ ثم يتوقّف أخيراً في مدينة نيويورك. ما مقدار المدة الزمنية التي ستستغرقها الرحلة؟

الإجابة: حوالي 16,3 دقيقة[13]! وهكذا يستطيع رجل أعمالٍ في شيكاغو أن يحدّدَ موعداً لاجتماعٍ سريع مع موظَفي مكتبٍ ما في مدينة نيويورك خلال ساعة، من دون حاجة إلى حزم أمتعته وتحضيرِ ثيابٍ داخلية نظيفة مع فرشاة أسنان. كلُّ ما عليه فعله هو الذهاب إلى «محطة القطار الفائقة في شارع لا سال (La Salle) وإبراز بطاقة الائتمان ثم الصعود إلى العربة ـ المركبة الوحيدة للقطار الفائق ذي الشكل المشابه لجسم طائرةٍ نفّاثة صغيرة ـ مثل بُوينغ (Boeing) 737 ـ والتي تتّسع لحوالي 100 شخص. تُغلق الأبواب أوتوماتيكياً كلَّ عشر دقائق، ومع امتلاء المركبة ينطلق القطار ليدخلَ عبر ممّرٍ خاصّ إلى نفقٍ شبه مفرَّغ بحيث لا يتعدّى الضغطُ فيه قيمةَ 0,01 جو. يتسارع بعدها القطارُ بشكلٍ مريح وهو مرتفع عن سطح الأرض فوق منظومةٍ مغناطيسية فائقة الناقلية تدفعه إلى الأمام من خلال التحريض المغناطيسي. بعد مرور 490 ثانية ـ أي حوالي 8 دقائق ـ يبلغ القطار الحدودَ بين أوهايو وبنسلفانيا، ويكون سائراً ـ على عمق كبير داخل النفق المُخلّى ـ بسرعة $v=at$ أي 5400 ميل في الساعة! بعد ذلك يبدأ القطار بالتباطؤ بشكلٍ لطيف، ليصلَ بعد حوالي 8 دقائق إلى مدينة نيويورك متوقّفاً في محطة قطار الأنفاق (المترو) الجديدة

---

(13) يكمن مفتاح القضية هنا في قياس المسافة x التي يقطعها جسمٌ متسارع بقيمة a خلال الزمن t. يمكن استنتاج الصيغة بعد مضي الأسبوع الأول في صفٍّ لدراسة الحساب الرياضياتي، ولكننا سنعطيكَ الجواب: $x=\frac{1}{2}at^2$ الآن ـ وبقصد المناقشة لا أكثر ـ سنفترض أنّ المسافة بين نيويورك وشيكاغو هي 1200 كلم (حوالي 800 ميل)، وبالتالي تكون المسافة إلى منتصف الطريق 600 كلم، ويستغرق هذا القسم من الرحلة زمناً تسمح بتعيينه الصيغةُ السابقة: $600\ km = 600000\ m = \frac{1}{2} x\ 5\ m/s^2 x t^2$، فنجد أنّ $t = 490$ ثانية. بما أنّ الرحلة المتباطئة للوصول إلى مدينة نيويورك تستغرق نفس المقدار الزمني (بسبب التناظر، إذ يمكننا تخيّلُ تشغيلِ ساعاتنا إلى الوراء خلال طور الحركة هذا)، فإنّ الرحلة بمجملها تستغرق $(T = 2t = 980\ seconds)$ أو حوالي 16,3 دقيقة!

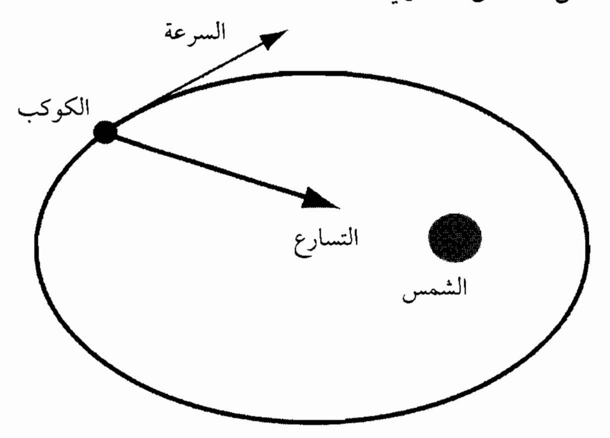
الواقعة في حي المال والأعمال في مانهاتن السفلية (Lower Manhattan). في الواقع يمكن تحقيق كلّ هذا عبر تقنيات تعود إلى الخمسينيات، شريطةَ توفّر جزءٍ يسير من ميزانية الولايات المتحدة العسكرية لعام 2005.

في هذه الأمثلة، كان اتجاه التسارع ـ وبالتالي القوة ـ موازياً لاتجاه سرعة الجسيم (سواء أكان «الجسيم» سيّارةً أم قطاراً يعمل بواسطة الرفع المغناطيسي). ومع ذلك يمكن للقوة في أمثلة أخرى أن تؤثّر بشكلٍ عمودي على اتجاه السرعة، جاعلةً ـ عبر قانون نيوتن ـ شعاعَ التسارع عمودياً بدوره على السرعة. في هذه الحالة نحصل على حركةٍ منحرفةٍ عن الخط المستقيم، فإذا بقيتْ شدةُ (طويلة) التسارع ثابتة دوماً وظلَّ اتجاهُه عمودياً دائماً على السرعة كانت الحركة دائرية.

واستناداً إلى ذلك تعني الحركةُ الكوكبية شبهُ الدائرية في نظرية كوبرنيكوس أنّ القوةَ المؤثرة على الكوكب معامِدةٌ تقريباً لشعاع سرعته. ليست الملائكةُ بالتأكيد ما يسيّر ويدفع الكواكب في مداراتها، بل بالأحرى الكواكبُ تتحرك لأنّ شيئاً ما في الماضي السحيق قد أطلقها (مثل انفجارِ سوبرنوفا لنجمٍ عملاق وضع الحطامَ الكوكبي الأصلي في حركة دوّامية)، ثم تكفّلت العطالةُ بالإبقاء على حركتها. أمّا القوة فهي موجودةٌ هناك كي تجرّها بشدة وتمنعها من الحركة في خطوط مستقيمة. يتّجه شعاع القوة نحو مركز المدار، ولكنْ لو نظرنا إلى هذا المركز لصرخنا «وجدتها Eureka!»، لأنه يظهر في النهاية أنّ شعاعَ القوة يتجّه نحو الشمس! تنجم القوةُ التي تتسبَّب بتسارع الكواكب في مداراتها إذاً عن الشمس (انظر الشكل 12).

أُعتبرت إنجازاتُ كوبرنيكوس وكبلر وغاليليو ونيوتن وغيرهم علاماتٍ بارزةً لعصرٍ مميَّز في تاريخ البشرية. يُدعى عصر نيوتن غالباً ببداية عصر **التنوير** (Enlightenment) (الذي نعتبره عادةً موافقاً للقرن

الثامن عشر) بسبب التغيُّرات العميقة التي طرأت على الفلسفة السياسية وعلى العلاقات التجارية وفي التكنولوجيا والاكتشافات المتعدّدة وفي فهمنا لجغرافية العالَم. ولكن تلك التسمية تستخدم بشكل خاص بسبب فهمنا الحديث والصحيح للحركة والقوى الفيزيائية، وبسبب الطرقِ والأساليب العلمية والمنطقية التي قادت إلى كلّ ذلك. لقد جلب توضيحُ القوانين التقليدية للفيزياء وشرحُها ـ في نهاية الأمر ـ عصراً غدا خلاله مجتمعُ «العالَم الأول» صناعياً، ونجمت عن ذلك رفاهية غير مسبوقة حتى بالنسبة إلى الناس العاديين، هذا بالإضافة إلى الحقوق السياسية والمعايير الجديدة للحكومات. قاد ذلك في آخر المطاف ـ مع اقتصارنا على ذكرِ قلّة من التطبيقات لا غير ـ إلى عصر قوة دفع البخار وصناعة الفولاذ والمولّدات والمحرّكات الكهربائية ثم إلى البرق والراديو والإضاءات الكهربائية. وافق عصرُ التنوير مرحلةً تمّت فيها ترجمةُ فعاليات البحث الأكاديمي ـ المقصور على فئة معيّنة قادرة على فهمه ـ إلى ازدهارٍ وإنعاشٍ لكل الجنس البشري.



الشكل 12: وجد نيوتن أنه من أجل حركة مدارية قطع ـ ناقصية للكوكب ـ كما تحدّدها قوانين كبلر ـ يكون شعاعُ تسارع الكوكب متّجهاً مباشرةً نحو الشمس.

الثقالة

لم ننته بعد من مناقشتنا حول مفهوم القوة. لقد رأينا أنّ الشمس تؤثّر فى الكواكب بقوةٍ تبقيها في مداراتها الدائرية حولها، ولكن ما هي هذه القوة الموجودة في كلّ مكان؟ إنها تُدعى **بالثقالة**.

مع قانون نيوتن الدقيق عن الحركة، نستطيع أن نسأل السؤالَ العلمي التالي: ما هي طبيعة قوة الثقالة بين الشمس وبين الكواكب والتي تحرف حركة الأخيرة عن أن تكون وفق خطوطٍ مستقيمة ليصيرَ لها مدارات قطع ـ ناقصية؟ ولماذا القطوع الناقصة؟ ما هو الشكل الرياضياتي الدقيق لقوة الثقالة؟

قام نيوتن بحلّ هذه المسائل، فبيّن باستعمال قوانين كبلر لحركة الكواكب أنّ شعاع التسارع لأيّ كوكب يتّجه دوماً نحو الشمس (مع تصويبات ضئيلةٍ ـ يمكن إهمالها ـ ناجمةٍ عن وجود الكواكب الأخرى مثل المشتري وزحل... إلخ). وجد نيوتن أن شدة (طويلة) تسارع أيّ كوكب **متناسبةٌ عكساً مع مربّع المسافة الفاصلة بين الكوكب والشمس**. وقد تبين إنّه لا علاقةَ البتة بين شدة التسارع وبين كتلة الكوكب تحت الدراسة! فقد قاد ذلك نيوتن إلى الاعتقاد بأنّ القوةَ المسؤولةَ عن تماسك المنظومة الشمسية معاً لابدّ أن يكون مصدرُها الشمس نفسَها، فالشمس هي التي تجرّ الكواكبَ فتحرفها عن الحركة المستقيمة التي كانت ـ بسبب العطالة ـ ستَتْبعها في غياب قوة الجرّ هذه. تَمثّل الإدراكُ الأعظم لنيوتن بأنّ الأرض بدورها تؤثّر على القمر بقوة أضعفَ، فتجرّه نحوها وتحرف حركتَه العطالية لتصبح حركةً في مسارٍ مغلق. وأخيراً أدرك نيوتن أن هذه القوة نفسها هي ما يمسك ويجذب جميعَ الأشياء إلى سطح الأرض ـ مثل الصخور والماء والهواء والناس ـ فهي تجرّها كلّها نحو مركز الأرض. يسمح ذلك ـ مثلاً ـ بتفسير سقوط التفاحة من أعلى الشجرة إلى الأرض. إنه

لأمرٌ عميق ولافت للنظر أن تكون القوةُ المؤثّرة على مجمل المنظومة الشمسية خالقةً المدارات الكوكبية، هي ذاتُها القوةُ التي نراها هنا على الأرض مانحةً الجبالَ والبحار والأعشاب والأشجار كلًّها مظهرَها الذي هي عليه. وجد نيوتن نفسه مقتاداً إلى إيجاد **القانون العام والشمولي للثقالة**.

لنحلّل بالتفصيل قانون الثقالة الشمولي هذا، وسيمثّل ذلك تمرينَ قراءةٍ من أجل الاعتياد على قراءة الصيغ الرياضياتية، وهذا أسهل من تعلّم قراءة نصوصٍ بالفرنسية (وهي مهمةٌ غير صعبة على كلّ حال) إذ يحتاج إلى قليلٍ من الصبر لا غير.

وفقاً لقانون نيوتن يُرمَز لـ**شدة (طويلة)** قوة الثقالة التي يؤثّر بها الجسم B على الجسم A بِـ F_{AB} وتُعطى بالصيغة:

$$F_{AB} = \frac{G_N m_A m_B}{R^2}$$

حيث R المسافة الفاصلة بين الجسمَين. تُسبّب مثلُ هذه الصيغ عادةً اختلالاً عند القارئ يُدعى بـ «زغللة العيون»، لذلك ـ من فضلكَ ـ قمْ بومضتَي عينٍ ثم أكملْ.

إنّ قانونَ الثقالة الشمولي هو مثالٌ عمّا يُعرَف في الفيزياء بـ **قانون قوة مربّعة المقلوب**، ويعني ذلك أنّ طويلة القوة ـ أو شدّتها ـ تتناقص عند المسافات البعيدة كتناقص $1/R^2$. إن القوة الكهربائية بين شحنتَين كهربائيّتَين ساكنتيَن تتبع أيضاً قانونَ قوةٍ مربّعة المقلوب.

بما أن القوةَ شعاعٌ فيجب أن يكون لها اتجاه، ويمكننا أن نكتب صيغة رياضياتية لتوضيح ذلك بشكلٍ أفضلَ، ولكن الكلمات تستطيع أن تفي بالغرض. يعاني الجسم A قوةَ ثقالة شدّتها تُعطى بالعلاقة المكتوبة أعلاه، وبسبب التناظر سوف يعاني الجسم B قوةً لها نفس الشدّة ولكن باتجاهٍ معاكس تماماً حيث تكون وجهتها نحو A.

في العلاقة المذكورة أعلاه: m_A هي كتلة الجسم A و m_B هي كتلة الجسم B، ويعني ذلك أنّ قوة الثقالة تكون أكثر شدّةً بين جسمَين ثقيلَين منها بين جسمَين خفيفَي الكتلة. على سبيل المثال، إذا كان الجسمُ A كوكبَ الأرض كانت $m_A = m_{Earth}$، وإذا كان B هو الشمس كان لدينا $m_B = m_{Sun}$، وبالتالي إذا استطعنا بطريقةٍ ما أن نضاعفَ كتلة الشمس مع إبقاء جميعَ الأشياء الأخرى كما هي، فعندها ستتضاعف قيمة قوة الثقالة التي تجرّ بها الشمسُ الأرضَ، وسيتغيّر مدار الأرض ليصبحَ بشكل قطعٍ ـ ناقصٍ «أكثر ضيقاً» ذي مسافةٍ وسطية أصغر عن الشمس.

من الجدير بالملاحظة أنّ الصيغة أعلاه متناظرة تماماً بين الجسمَين A وB. يعني ذلك أنه إذا بادلنا بين A وB في أيّ مكانٍ يظهران فيه في الصيغة، فإننا سنحصل على النتيجة نفسها لشدّة (طويلة) القوة بين الجسمَين (بينما سيتبادل الاتجاهان وضعَيهما بشكلٍ موافق). إنّ جميع الأجسام تتحرك بالطريقة نفسها وتشعر بالثقالة بالشكل نفسه، لذلك يُدعى قانون الثقالة بـ «الشمولي».

أمّا G_N في البَسْط فهو **ثابتٌ أساسي**، كان على نيوتن إدخاله من أجل تمييز **شدّة** قوة الثقالة، وندعوه بثابت نيوتن للثقالة (أو اختصاراً بثابت نيوتن). إن تاريخ القياس التجريبي لـ G_N ممتعٌ ومثيرٌ للانتباه، ولكن لنقتصر الآن على ذكر أفضلِ قيمةٍ حُدِّدت له. يتمّ قياس هذا «العدد السحري» عن طريق التجربة، وقيمته تساوي $(G_N = 6{,}673 \times 10^{-11}\ m^3/\ kg\ s^2)$.

يجب أن نلاحظ أنّ G_N ليس مجرّد عددٍ رياضياتي ـ مثل العدد 3,1415 ـ بل هو بالأحرى **عدد فيزيائي** لأنّ قيمته يجب إعطاؤها بالنسبة إلى نظام واحدات معيّن، وسيختلف مقدارها في هذا النظام عنه في أنظمةِ واحداتٍ أخرى. لقد حدّدنا قيمة G_N في نظام

واحدات المتر والكيلوغرام والثانية، وفي الواقع يمكننا أن نكتب بطريقة غير علمية $G_N = 0{,}00000000006673\ m^3\ Kg\ s^2$، ليتبدّى لنا أنّ G_N عدد صغيرٌ جداً. إنّ الثقالة - بالرغم من خاصّيةِ كليّة الوجود التي تتمتّع بها في الطبيعة - هي قوة ضعيفةٌ جداً في الحقيقة[14]!

عندما نقف على سطح جسم كروي كبير - هو الأرض عادة - كتلته مساوية لـ m_{Earth}، فإننا نشعر بجذب الثقالة الناجمة عن مجمل المادة الواقعة أسفل قدمَينا. من أجل حساب قوة الثقالة التي تؤثّر بها الأرضُ على الأشياء الواقعة على سطحها، فإننا نعتبر قيمة R مساويةً للمسافة عن مركز الأرض أي نصف قطر الأرض R_{Earth}. هذا صحيحٌ رغم أنّ كتلة الأرض ليست متمركزةً كلّها في المركز (لقد مثّل إثباتُ هذا الأمر مسألةً صعبة البرهان رياضياتياً خلال زمن نيوتن، وربّما تكون هي التي دفعته إلى اختراع الحساب التكاملي الذي يُستعمل في أغلب البراهين الموجودة في الكتب المرجعية خلال السنوات الجامعية الأولى).

بأخذ ما سبق بعين الاعتبار، لنتناول الآن قضية تسارع سقوط التفاحة (الجسم A) نحو الأرض (الجسم B). بتطبيق الصيغة المذكورة أعلاه نجد أنّ شدة (طويلة) القوة التي تعانيها التفاحة **والناجمة عن** الأرض هي $F_{apple}=G_N\, m_{apple}\, m_{Earth}\,/(R_{Earth})^2$، أما وجهة شعاع هذه القوة فهي نحو مركز الأرض. من ناحية أخرى بتطبيق قانون نيوتن الثاني - أي معادلة الحركة - نجد أنّ هذه القوة تولّد تسارعاً للتفاحة مقداره $F_{apple}= m_{apple}\, a_{apple}$، وبالتالي: m_{apple}

(14) من أجل الإحساس بمدى ضعف قوة الثقالة قمْ برفعِ غالونٍ مملوءٍ بالحليب. إنّ القوة التي تبذلها من أجل تحقيق ذلك تزيد بقليل عن ثمانية أرطال (باوندات). هذا مماثلٌ تقريباً لشدة قوة الثقالة التجاذبية بين صهريجَي نفطٍ مليئين تماماً وتفصلهما مسافةُ عشرة أميال.

$a_{apple} = G_N \, m_{apple} \, m_{Earth} / (R_{Earth})^2$. هناك قوةٌ تؤثّر بها الشجرةُ على التفاحة ـ بواسطة ساقها ـ مادامت التفاحة باقية على غصن الشجرة، وهي توازن تماماً قوة الثقالة، وبالتالي لا تتحرك التفاحة. لكنْ بمجرّد تحرير التفاحة عبر قطع ساقها، تصبح القوة الوحيدة المؤثرة على التفاحة هي الثقالة، وبالتالي تسقط التفاحة متسارعةً نحو الأرض.

هناك أمرٌ لافت للنظر تعلّمنا إياه مسألة الأرض والتفاحة هذه. لنحسب التسارع الذي تكتسبه التفاحة من جرّاء الثقالة. نستطيع القيام بذلك عبر إجراء قسمة كلا طرفي المعادلة أعلاه على كتلة التفاحة، فنجد $g = a_{apple} = G_N \, m_{Earth} / (R_{Earth})^2$. تقول هذه الصيغة الأخيرة إنّ تسارع التفاحة خلال سقوطها نحو الأرض **لا** يعتمد على كتلة التفاحة! في الحقيقة إنّ التسارعَ الذي تكتسبه التفاحة هو نفسه من أجل جميع الأجسام القريبة من سطح الأرض، فمقداره لا متغيّر مهما كان حجم وكتلة وشكل الجسم. لقد تعرّضنا في الفصول الماضية لشدة (طويلة) هذا التسارع مع شركة الأوج للطاقة الكهربائية، ورمزنا له معيارياً بـ g الذي يدلّ على التسارع الذي تكتسبه جميع الكائنات على سطح الأرض بفعل الثقالة. يمكننا أن نعوّض المقاديرَ في الصيغة أعلاه بقيمها: كتلة الأرض ونصف قطر الأرض (المعروف من نتيجة إيراستوسثينيس الشهيرة) وقيمة ثابت نيوتن للثقالة، لنجد القيمة التقريبية لـ $g = 10 m/s^2$ وبالطبع يمكننا من خلال قياس ثابت نيوتن بشكل مستقلّ في المخبر ومعرفة نصف قطر الأرض و g أن نحدّد قيمة كتلة الأرض، وهذه هي الطريقة المتّبعة في الواقع.

تسقط جميعُ الأجسام بالتسارع نفسه g إذا ما أهملنا مقاومة الهواء. يبدو ذلك من أول وهلة أمراً مذهلاً، فهو يناقض وبشكل

درامي الادّعاءَ القديم لأرسطو القائل بأن ثقلاً وزنه عشرة أرطال يسقط بشكل أسرع بعشر مرّات من ثقلٍ وزنه رطل واحد. يُقال إنّ غاليليو قام بالبرهان العلني على حقيقة استقلال التسارع عن الثقل، عندما ألقى زِنَتَين مختلفتَين من أعلى برج بيزا (Pisa) المائل، فسقطتا معاً إلى الأرض ووصلتا في اللحظة نفسها ضمن الحدود المتوفّرة في ذلك العصر لدقة الملاحظة. في الواقع نحن لا نعرف ما إذا كان غاليليو قام فعلاً بهذه التجربة أم لا، ولكنّ كثيراً من الناس لغاية اليوم يعتقدون أنّ الأجسامَ الثقيلة تسقط بشكلٍ أسرع من الأجسام الخفيفة.

هناك تجربة فيزيائية نموذجية يمكن إجراؤها في قاعة الصف، وتقوم بمقارنة معدَّلَي السقوط لقطعة معدنية من النقود وريشة طائر، تُتركان لتسقطا من أعلى أنبوبٍ زجاجي طويل يمكن تخليته من الهواء. قبل التخلية تصل القطعة المعدنية إلى القاع بأقلّ من ثانية، بينما تستغرق الريشة في سقوطها للأسفل حوالي 10 ثوان. يُعاد السباق بعد تخلية الأنبوب من الهواء، فنجد أنّ القطعة المعدنية والريشة كلتيهما تلمسان قاع الأنبوب في اللحظة نفسها. أجرى رائد الفضاء دايفد سكوت (David Scott) من روّاد مركبة الفضاء **أبولو** (Apollo) 15 تجربةً مماثلة على سطح القمر حيث لا يوجد غلاف جوّي، وذلك عندما ألقى ريشةَ طائر ومطرقة فوجد أنهما وصلتا إلى سطح القمر معاً في اللحظة نفسها (هذا مع ملاحظة أنّ قيمة التسارع على سطح القمر تبلغ سدسَها على الأرض، لأنها تتضمّن التعويضَ بقيم m_{Moon} وR_{Moon} في الصيغة سابقة الذكر).

نتيجةً للتناظر يجب أن تتسارع الأرض بدورها نحو التفاحة، ولكن شدّة (طويلة) هذا التسارع أصغر بدرجة فائقة من شدّة تسارع التفاحة g، حيث يكون ذلك بمقدار m_{Apple}/m_{Earth}، لذا يمكن

إهمال تسارع الأرض نحو التفاحة. رغم هذا يبقى **الاندفاع الكلي** لجملة الأرض مع التفاحة مصوناً نتيجةً لقانون نيوتن الثالث. في الحقيقة يمكن أن نلاحظ أنّ قانون نيوتن للثقالة لا يحتوي على أيّ إشارة إلى مكانٍ مميَّزٍ في الفضاء، بل يتضمّن الموضعَ النسبي (والاتجاه) بين التفاحة والأرض لا غير. وبذلك فالصيغة نفسها التي نستعملها في منظومتنا الشمسية نستطيع استخدامَها حتى في أماكنَ بعيدةٍ جداً مثل مجرّة المرأة المسلسلة ـ الأندروميدا (Andromeda)! إن الصيغةَ متناظرةٌ انسحابياً، وبالتالي يكون الاندفاعُ ـ حسب نظرية نوثر ـ مصوناً.

يمكننا من خلال قانون نيوتن في الثقالة مع قليلٍ من التحليل الرياضياتي التعرّضُ إلى مفهوم «الطاقة الكامنة الثقالية». يملك الجسم الساكن في أعلى قمة برجٍ ما طاقةً كامنةً ثقالية أكبر ممّا لو كان عند أسفل البرج. يعني ذلك أنّه إذا كان الجسم في لحظة البداية ساكناً في قمة البرج، فإنّ الطاقة الحركية له تكون معدومة، بينما تكون طاقته الكامنة كبيرة. عندما يسقط الجسم، تبدأ طاقته الكامنة بالتناقص، ولكنها تتحوّل إلى طاقة حركية آخذةٍ بالتزايد مع زيادة سرعة الجسم في أثناء السقوط نحو الأسفل.

اكتشف نيوتن أنّ الحركات المدارية للكواكب ـ كما تتنبّأ بها قوانينه الرياضياتية ـ تتمّ فعلاً وفق قطوع ناقصة. وهكذا يكون قد قدّم تفسيراً كاملاً لقوانين كبلر الظواهرية عبر نظريته الشمولية عن الثقالة ومن خلال قوانين الفيزياء التقليدية الأكثر عمقاً التي عبّرت عنها هذه النظرية. مثّل كلُّ ذلك إنجازاً رياضياتياً رائعاً لنيوتن لاسيما أنه احتاج لإتمامه إلى اختراع فرع جديد من الرياضيات هو الحساب التفاضلي والتكاملي. وجد نيوتن كذلك ضمن رياضياتِ حساباتِه ـ بالإضافة إلى المدارات القطع ـ ناقصية للكواكب ـ مداراتٍ

تعبّر عن مساراتٍ مفتوحة قطع - زائدية أو قطع - مكافِئية توافق أجساماً ثقيلةً آتيةً من مسافات لا متناهية في البعد، يتمّ حرفها - أو «بعثرتها» - من قبل الشمس (مثل المذنّبات)[15]. وبالنسبة إلى المنظومة الشمسية بالذات، كانت هناك تعديلاتٌ وتصحيحاتٌ على الحركة الصرفة القطع - ناقصية تنجم عن التفاعلات الثقالية بين جميع الكواكب. يمكن للمرء الآن اكتشاف كواكب جديدة - مثل الكُوَيكب سيدنا (Sedna) - تقع على مسافاتٍ أبعد من مدار بلوتو (Pluto)، وذلك عبر تحليلٍ دقيق - من خلال قانون نيوتن - للتذبذبات في المدارات الكوكبية الموجودة في المعطيات الفلكية المفصّلة[16]. لقد نجح مشروعُ الفضاء الأميركي (وكالة الفضاء والطيران الوطنية - ناسا اختصاراً - National Aeronautics & Space Administration -NASA-) عام 1969 بإنزال روّاد بشريين على سطح القمر وبإطلاق مركباتٍ حامت في الفضاء البعيد، وكلّ هذا بالاعتماد على قوانين نيوتن في الحركة لا غير.

لكن رغم كل ما قلناه، تنهار حتى نظرية نيوتن - في نهاية

---

(15) في الحقيقة - وبعد مضي قرنَين ونصف من الزمن على عهد نيوتن - كان إرنست رذرفورد (Ernest Rutherford) يُطلِق جسيمات ألفا مشحونة (اكتشفها الزوجان كوري (Curie) من قبل) على الذرّة، فوجد أنّ نفسَ مسارات التبعثر تحدث هنا أيضاً، مّما أثبت امتلاكَ الذرّة لمركز شبيه بالشمس في منظومتها دُعي باسم النواة. كانت جسيمات ألفا تتمّ بعثرتها بواسطة القوة الكهرمغناطيسية الناجمة عن النواة، وهي قوة ذات «قانون مربّع مقلوب» مثلها في ذلك مثل قوة الثقالة.

(16) تمّ الإعلان عن اكتشاف الكويكب سيدنا (Sedna) في آذار/ مارس 2004، وهو الكوكب العاشر في منظومتنا الشمسية بمدارٍ قطع - ناقصي شديد، ولكننا نعتقد بوجود كثيرٍ من الأجرام الأخرى المماثلة له والبعيدة عنا. انظر على سبيل المثال إلى المقالة: Michael E. Brown, «Sedna (2003 vb12),» in: www.gps.caltech.edu

والمقال: «Sedna (Planetoid),» in: www.en.wikipedia.org

(كلا الموقعَين وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 3 حزيران/ يونيو 2004).

الأمر ـ وتصبح عاجزةً عن وصف ظواهرَ تتضمّن حركاتٍ بسرعاتٍ تقترب من سرعة الضوء. في الحقيقة استدّعت النظريةُ الصحيحة للثقالة مراجعةً مذهلةً بشكلٍ كاملٍ وجذري لوجهة نظر نيوتن، فقد استبدل إينشتاين النسبيةَ العامة بنظرية نيوتن مفسِّراً سبب شمولية الثقالة وكيفية تضمّنها لهندسة المكان والزمان. ومع ذلك تمثّل الفيزياء النيوتنية ـ ضمن مجال صلاحيتها ـ الوصفَ الصحيح للطبيعة، وقد وجدت لتبقى.

يشمل مجالُ صلاحية الفيزياء النيوتنية كلَّ شيءٍ نألفه في حياتنا اليومية، ولكنها تنهار وتصبح غير صالحة من أجل الكائنات الصغيرة جداً أو التي تتحرّك بسرعات قريبة من سرعة الضوء. وما الذي يحلّ محلّها؟ بالطبع إنه تناظرات جديدة أفضل منها لأنها أوسع مجالاً وأكثر عمقاً.

الفصل السابع

النسبية

لن يكون هناك بعد اليوم مكان وزمان مستقلان أحدهما عن الآخر، إذ سيفقدان منزلتَهما وسيتحولان إلى شبحين باهتين، وسيعطيان باتحادهما معاً كائناً جديداً هو وحده من سيكتب له البقاء، وسيظل محافظاً على استقلاليته

هرمان منكوفسكي (Hermann Minkowski) ـ **الزمان والمكان**

سرعة الضوء

اعتقد كثيرٌ من الفلاسفة والعلماء القدماء ـ مثل أرسطو وديكارت ـ أنّ سرعة الضوء لامتناهية في الكبر، وبالتالي فإنّ الضوء ينتقل آنياً في الفضاء.

تطرّق إلى ذهن غاليليو ـ مع ذلك ـ أن يختبر إمكانية انتقال الضوء بسرعة منتهية، فصمّم طريقةً بدائيةً لمحاولة قياسها. تنصّ تلك الطريقة على إطلاقه لإشارة ضوئية وامضة نحو مراقبٍ بعيد جداً ـ هو مساعده ـ يقوم بدوره فور استلامه للإشارة بإطلاق إشارة وامضة مشابهة لتعود في اتجاه غاليليو. تطلّبت الطريقةُ إذاً ردَّ فعلٍ سريع من قبل المساعد، يضمن صِغَر زمن استجابة هذا الأخير عند رؤيته

للومضة الأولى وإصداره للإشارة العائدة. حاول غاليليو كشفَ ما إذا كان هناك فرق زمنيٌ محسوس بين ومضتَي الإطلاق والعودة يزداد كبراً مع تزايد المسافة بينه وبين مساعده، إذ كان مثل هذا الفرق سيعني تأخّراً زمنياً متناسباً مع المسافة، لكنه فشل في تبيان أيّ أثرٍ لسرعة الضوء هنا، لأنّ استجابة الكائن البشري تُعتبَر بطيئة جداً عند مقارنة مدتها مع الزمن الذي تستغرقه ومضةٌ ضوئية لقطع مسافاتٍ أرضية. رغم هذا استطاع غاليليو إثباتَ أنّ سرعة الضوء يجب أن تتجاوز قيمة ستة آلاف مل في الساعة (في الواقع تتجاوز سرعة الضوء هذه القيمة بحوالي المئة ألف ضعف)[1].

تمّ اكتشاف وجود سرعة منتهية للضوء لأول مرة في مجال علم الفلك. اكتسب هذا العلم أهميةً أساسية خلال عصر الامبراطوريات الكبرى بأراضيها الممتدة ما وراء البحار، وحاز على اهتمامٍ رسمي في فرنسا وبريطانيا حيث تمّ إنشاء مؤسسات حكومية تعنى به. كان علم الفلك ضرورياً بشكلٍ خاصّ من أجل الملاحة البحرية العامة ومعرفة الوقت في أيّ مكانٍ من العالَم، فمعرفة خطَّي الطول والعرض الموافقَين لموقع السفينة في المحيط كانت أساسيةً وضروريةً للملاحة البحرية وحتى للبقاء على قيد الحياة في أثناء الإبحار. وكان الربّان يستطيع عبر استعمال آلة السُّدْس تحديدَ خطّ العرض في البحر بسهولة، وذلك من خلال قياس الارتفاع الزاوي للشمس عن الأفق عند وصولها لقّمة مسارها في أثناء النهار. تُدعى هذه النقطة بـ «الظهيرة الموضعية»، وهي

(1) يقدّم الأستاذ مايكل فاولر (Michael Fowler) من جامعة فرجينيا (Virginia) صفحةً إلكترونية رائعة عن تاريخ وفيزياء النظرية النسبية، بما في ذلك قياسات سرعة الضوء، انظر: Michael Fowler, «Galileo and Einstein,» www.galileoandeinstein.physics.virginia.edu

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 3 حزيران/ يونيو 2004).

توافق اللحظة التي تبلغ الشمس فيها أعلى ارتفاعٍ لها في السماء.

بالمقابل مثّل تحديدُ خطّ الطول مهمةً أكثر صعوبة، لأنها تضمّنت في أساسها قياساً للزمن. يحتاج المرءُ لأن يعرفَ تماماً كم الوقت في غرينتش (Greenwich) في لحظة مشاهدة الظهيرة الموضعية في البحر من أجل تعيين خط الطول في موقعه. على سبيل المثال، إذا علمتُ أنّ الوقتَ في غرينتش هو الساعة الواحدة بعد الظهر عندما تكون الشمس في نقطة الظهيرة الموضعية عندي، فإنني أستنتج أنّ خط الطول في موضعي يقع على بعد 15 درجة إلى الغرب من غرينتش (توافقُ الساعة الواحدة 15 درجة، لأن 24 ساعة × 15° = 360° أي دورة كاملة للأرض). لسوء الحظ لم تتوفّر الساعات الميكانيكية المرنة والموثوقة للملاحة البحرية إلاّ في فترة تاريخية متأخّرة عمّا نتحدث عنه وبوقتٍ طويل[2].

تسبّب خطأٌ فاضح في تحديد خطّ الطول ارتكبه أدميرال بريطاني عام 1707 بخسارة أربع سفنٍ حربية وألفَي روح بشرية، وذلك عندما اصطدمت السفن بالأرض نتيجةً للخطأ المذكور (هذا من دون التطرّق إلى حياة بحّارٍ مسكين كان يحفظ المواقع الصحيحة لخطوط الطول كهواية، وتمّ شنقه متدلّياً من عنقه في حوض السفينة بتهمة التمرّد، عندما تجرّأ وشكّك بحسابات وتقديرات الأدميرال[3].

---

(2) دوّن دافا سوبل (Dava Sobel) في كتابه سرداً رائعاً لتاريخ مسألةِ معرفةِ خطّ الطول وكيفية حلّها. في الحقيقة عارض الفلكيون منحَ أيّ جائزة ل لجون هاريسون (John Harrison) تقديراً للمجهود البطولي الذي قام به وحده، حيث يُعتبر أوّل من صنع ساعاتٍ صالحةً للإبحار، انظر: Dava Sobel, *Longitude: The True Story of a Lone Genius who Solved the Greatest Scientific Problem of his Time* (New York: Walker, 1995).

(3) المصدر نفسه، ص 11 ـ 13. في ما يخصّ غرق سفن الأدميرال السير كلاوديسلي شوفل (Admiral Sir Clowdisley Shovell) المأسوي عند جزر سيلي (Scilly) بالقرب من الطرف الجنوبي الغربيّ لإنجلترا.

اعتقد كثيرٌ من العلماء أنّ مسألة صنع ساعاتٍ ميكانيكية للملاحة البحرية هي أمرٌ عسير وغير طيّع، مما دعاهم للحثّ على استعمال «ساعاتٍ فلكية»، ونعني بها أيَّ ظاهرةٍ طبيعية تحدث في السماء المظلمة في أوقات منتظمة وقابلة للتنبّؤ بها. تكون مثلُ هذه الحوادث قابلةً للملاحظة من أيّ مكانٍ على الأرض بما في ذلك البحر، وبالتالي يمكنها أن توفّر وسيلةً للتسجيل المجرَّد للوقت. هذا بالرغم من أنّ القياس الدقيق للزمن بهذه الطريقة لم يكن سهلَ المنال، حيث إنه كان يستلزم شروطاً مناخية ملائمة وقياساتٍ متعبة من على سطح سفنٍ تطوف فوق مياهٍ هائجة أحياناً.

في عام 1676 كان الفلكي الدانمركي أولي رومر (Ole Romer) العامل في مرصد باريس الفلكي يدرس بالتفصيل حركة أقمار المشتري. تمّ اكتشاف أكبر توابع هذا الكوكب الضخم في اليوم الموافق لـِ 7 كانون الثاني/ يناير من العام 1610، وذلك من قبل غاليليو باستخدام تلسكوبه ذي القوة التكبيرية المكافئة لعشرين مرّة، فسُميّت بعدها بـ «أقمار غاليليو»: إِيو (Io) ويوروبا (Europa) وكالّيستو (Callisto) وغانيميد[4]. يشابه دورُ الحركة المدارية لأيّ قمرٍ للمشتري دورَ نواسِّ ساعةٍ منتظمةٍ، ويمكن ـ من حيث المبدأ ـ

(4) يمكن رؤية أقمار غاليليو بواسطة أيّ مقراب زهيد الثمن تضعه في فناء منزلك الخلفي خلال ليلةٍ صافية يحوم فيها المشتري بوضوح في السماء. يؤلّف المشتري مع أقماره منظومةً لها بنية مشابهة لبنية المنظومة الشمسية ولكن بشكل أصغر. إنّ مدارات الأقمار دائرية الشكل تقريباً، وتتحدّد الحركات المدارية وأدوارُها بواسطة قوانين كبلر التي يحكمها بدورها قانون نيوتن الشمولي في الثقالة ومبدأ العطالة. تمّ تصوير هذه الأقمار في الوقت الراهن بالتفصيل بواسطة القمر الصنعي الطائر **غاليليو** (Galileo) التابع لمخبر الدفع النفّاث لـناسا (NASA/Jet Propulsion Laboratory) (JPL)، انظر: Galileo: Journey to «Jupiter,» www2.jpl.nasa.gov

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 3 حزيران/ يونيو 2004).

تحديده ومراقبته من أنحاء الأرض كلّها شريطةَ توفر تلسكوبٍ جيد وشروطِ طقسٍ ملائمة تسمح برؤية المشتري. تستطيع هذه الظاهرة إذاً أن تزوِّدنا بما يشبه ساعةً نموذجيةً لقياس الزمن، فهي تتصف بالشمولية حيث تصلح في جميع أرجاء العالم وكذلك بعدم التغيّر مما يمكّننا من استخدامها دوماً.

كان إِيو ـ وهو ثالث أقمار غاليليو كِبَراً مع دورِ حركةٍ مداريةٍ مساوٍ تقريباً لـ 1,8 يوماً أرضياً ـ مرشَّحاً مناسباً لأن يكون ساعةً نموذجية كونية. كان إِيو يختفي (أي يعاني حادثة خسوفٍ) خلال فتراتٍ منتظمة موافقة لحركته خلف كوكب المشتري، وكان مداره يرسم دائرةً مثاليةً تقريباً. وبذلك زوّدنا بفواصل ومجالات زمنية منتظمة لتكّةِ «تِك ـ تَك»، حيث توافق الـ «تِك» لحظةَ اختفائه (لحظة الخسوف) خلف قرص المشتري والـ «تَك» لحظة عودة ظهوره. ولكن رومر اكتشف أمراً دقيقاً وغريباً، إذ قام أولاً بواسطة ساعةِ مخبره المرتبطة بالأرض بقياس المواعيد الزمنية الموافقة للخسوفات ـ أي لحوادث التِّكات والتَّكات ـ عندما كانت الأرض أقربَ ما يمكن إلى المشتري في مدارها، ثم لاحظ مع ابتعاد الأرض عن المشتري في أثناء جولانها في مدارها أنّ هذه المواعيد الزمنية للتِّكات والتَّكات تباطأت عمّا هو متوقّعٌ لها. بعد مرور ستة أشهر ـ أي عندما كانت الأرض أبعد ما يمكن عن المشتري في مدارها ـ كانت حوادث الخسوف تجري متخلّفةً بمقدارٍ كبيرٍ يبلغ ستّ عشرة دقيقة. وبعد ستة أشهر أخرى ـ عندما عادت الأرض في مدارها وأصبحت قريبةً من المشتري ـ لاحظ رومر أن التأخّر الزمني المذكور أعلاه قد اختفى، وأن تِكّات وتَكّات حوادث الخسوف عادت تحصل في مواعيدها المتوقَّعة. تُعيد هذه الدورة نفسها مرّة واحدة خلال كلّ سنة أرضية.

لقد كان اكتشافُ رومر إحدى تلك الحوادث السارّة في تاريخ

العلم، حيث يجد المراقبُ نفسَه أمام مفاجأةٍ كبيرة بينما يكون مهتمّاً بقياس شيءٍ عاديّ بتفصيلٍ ودقةٍ كبيرة. أدرك رومر أنّ هذه الدورة السنوية لتخلّف الـ «تِك ـ تَك» توافق تغيّرَ المسافة بين الأرض وجملة المشتري ـ إِيو أثناء الحركة المدارية. واستطاع رومر أن يتوصَّل إلى التفسير الصحيح لهذا الأثر في أنّ الضوءَ الصادرَ من إِيو يسير بـ**سرعة محدودة** ـ فالضوء يقطع مسافةً أكبر عندما تكون الأرض أبعدَ ما يمكن عن إِيو منها عندما تكون الأرضُ أقربَ ما يمكن إليه ـ ومنه يأتي التأخّر الزمني عندما تكون الأرض بعيدة. قاس رومر تخلّفاً زمنياً قدره ستّ عشرة دقيقة، وهذا يعني أنّ الضوء يحتاج إلى ستّ عشرة دقيقة لاجتياز مسافةٍ تعادل قطرَ مدار الأرض، أي يحتاج إلى ثماني دقائق ليقطعَ **نصفَ قطر المدار** الموافق للمسافة بين الشمس والأرض. من أجل تحديد سرعة الضوء c نحتاج إذاً إلى معرفة المسافة بين الأرض والشمس (نصف قطر مدار الأرض)، فتكون السرعة مساويةً لحاصل قسمة هذه المسافة على زمن الثماني دقائق اللازم لقطعها.

تُدعى المسافة بين الأرض والشمس بـ**الوحدة الفلكية** ويُرمز لها بـ AU وهي أهم مقياسٍ مسافات في تاريخ علم الفلك، إذ إنها تحدّد القاعدة في المثلث المستخدَم لحساب المسافات التي تفصلنا عن النجوم القريبة، ويعني ذلك أنّ الوحدة الفلكية هي «مقياس أداة الرصد» في علم الفلك. مع ذلك من الصعب جداً لسوء الحظ تعيين قيمة الـ AU، وقد جرَّب الإغريق أساليبَ وطرقاً عبقرية عديدة لقياسها، ولكنهم لم يحصلوا على أيّ قياسٍ دقيقٍ لها، بل كانت التخمينات التي أعطوها يختلف بعضها عن بعض بمقادير كبيرة من رتبة العشر مرّات أو أكثر.

عندما نحاول قياسَ مسافةٍ فلكية تفصلنا عن جسمٍ غيرِ بعيدٍ جداً

ـ ولنقل نجماً قريباً (بعده عنا حوالي خمسين سنة ضوئية أو شيءٌ من هذا القبيل) ـ فإنّ بمقدورنا استعمال الهندسة. يتمّ ذلك بأن نقيس في تاريخٍ ما ـ ولنقل 1 شباط/ فبراير ـ ما يُدعى بـ**الموضع الظاهري** للنجمِ في السماء نسبةً إلى **نجوم الخلفية** الأبعد بكثير. ثم بعد مرور شهرين ـ عندما تكون الأرض قد قطعت مسافة مساوية تقريباً لوحدةٍ فلكية واحدة على طول محيط مدارها ـ نراقب مرة أخرى النجم نفسه لنجد أنّ موضعه الظاهري بالنسبة إلى النجوم البعيدة قد انزاحَ قليلاً. إنّ هذا الأثر مألوف، إذ إنّ شجرةً قريبةً لنا سوف تبدو كأنها قد غيّرت موضعها بالنسبة إلى الأشجار البعيدة إذا ما غيّرنا قليلاً نقطةَ المراقبة التي نراها منها. يُدعى هذا الأثر باسم **أثر اختلاف أو انزياح المنظر (البارالاكس** (Parallax)). إننا نتكلّم في حالة النجوم البعيدة عن تغيّراتٍ فائقة الضآلة في الموضع الظاهري، وبالتالي لا يمكن قياس أثر اختلاف المنظر إلاّ بالمقارنة مع مواضع الكائنات البعيدة ضمن نطاق الرؤية لعينيّة عدسات تلسكوب المراقِب. يمكننا من خلال معرفة البارالاكس بين قياسَين ومعرفة طول القاعدة ـ وهي القطعة المستقيمة الفاصلة بين مكانَي إجراء القياسَين ـ أن نحسب المسافة التي تفصلنا عن الجسم. يكمن إذاً مفتاحُ قياس أثر البارالاكس في أنّ النجوم البعيدة لا يتغيّر موضعها الظاهري النسبي في السماء بشكلٍ محسوس خلال السنة، وبالتالي فهي تزوّدنا بـ «منظومة إحداثيات ثابتة» من أجل قياس الانزياح الخفيف في موضع النجم قيد الدراسة.

تكمن المشكلة الرئيسة لقياس المسافة بين الأرض والشمس إذاً في **عدم** وجود منظومة إحداثيات ثابتة في السماء يمكن استخدامها لقياس التغيّر (الزاوي) في موضع الشمس عندما نجتاز على الأرض مسافةَ قاعدةٍ معروفةً، وذلك لأنّ منظومة الإحداثيات المتمثّلة

بـ «النجوم الثابتة» البعيدة لا تكون مرئيةً إلا في سماءٍ مظلمةٍ وقتَ الليل فحسب. لنقل بطريقة صريحةٍ جافّة إنّ السببَ الذي يمنعنا من قياس المسافة التي تفصلنا عن الشمس باستخدام البارالاكس هو أنّ النجوم لا تشعّ في ضوء النهار! وتكمن الحيلة في قياس الوحدة الفلكية في عدم محاولة قياس المسافة إلى الشمس مباشرةً، بل بالأحرى القيام بقياس المسافة التي تفصلنا عن المريخ الذي تزوّدنا النجوم البعيدة بمنظومة إحداثيات مناسبة للبارالاكس من أجله، ممّا يمكّننا لاحقاً باستخدام قوانين كبلر لحركة الكواكب من تحديد قيمة الوحدة الفلكية.

وبالفعل تمّ قياس الوحدة الفلكية لأول مرة بدقةٍ وصلت إلى 1 في المئة في سنة 1685 عبر تجربةٍ أجراها جيوفاني كاسيني (Giovanni Cassini) الذي كان الفلكيّ الأهمّ في باريس. تطلّبت تلك التجربة قاعدةً طويلة أمكن تأمينها من خلال قطر الأرض المعروف. وبالتالي احتاجت التجربة إجراءَ قياسَين - يفصل بينهما قطر الأرض - في آنٍ واحد لموضع المريخ بالنسبة إلى النجوم الثابتة.

أُعطيَت تعليماتٌ محدّدة لسفينة بحرية بقياس الموضع الظاهري للمريخ أثناء الإبحار في القسم الجنوبي من المحيط الهادي. في الوقت نفسه تمّ كذلك قياس الموضع الظاهري للمريخ في مرصد باريس. عندما عادت السفينة تمّت مقارنة نتيجتَي قياس الموضع الظاهري، وأمكن حساب المسافة بين الأرض والمريخ بدقة من خلال معرفة طول الخط القاعدي الفاصل بين المراقبَين. بعد ذلك بواسطة: (1) معرفة طول المدة الزمنية لدَوْر الأرض المداري (سنة واحدة)؛ (2) معرفة طول دَوْر كوكب المريخ (1,88 سنة)؛ (3) قياس المسافة الفاصلة بين كوكبَي الأرض والمريخ عند وضع اقترابهما الأعظمي واحدهما من الآخر؛ (4) قانون كبلر للحركة الذي يربط

بين مدة الدور اللازمة لإتمام دورةٍ واحدة على المدار وبين نصف قطر هذا المدار؛ و(5) استخدام قليلٍ من الجبر، يمكن للمرء في النهاية حساب المسافة بين الشمس والأرض[5]. أخيراً من ملاحظة رومر للتأخّر الزمني بمقدار 8 دقائق الذي يلزم للضوء كي يقطع المسافةَ بين الشمس والأرض، تتحدّد قيمة سرعة الضوء على أنها مساوية لـ 300,000 كيلومتر في الثانية (أي 186,000 مل في الثانية).

من المفيد أن نتأمّل بمدى كِبَر هذه السرعة، فقيمتها تتجاوز بكثير ما نألفه في تجارب حياتنا اليومية العادية المستقاة ممّا نشاهده ونسمعه، وتقودنا نحو عالَم فيزيائي جديد. يبلغ قطر الأرض حوالي 12,720 كلم (7,904 ميل)، وبالتالي يستغرق الضوء لقطع هذه المسافة زمناً مقداره (1/24) ثانية، أي ما يقارب الحدّ الأصغري للفترات الزمنية التي يمكن للإنسان التمييز بينها. يحتاج الضوء إلى (1/8) ثانية ليقطع كاملَ محيط الأرض، وفي مقدورنا عموماً

---

(5) لنفترض أنّ المدارات دائرية، ولنرمز بـ T_E للدور المداري للأرض (سنة واحدة) وبـ T_M للدور المداري للمرّيخ (1,88 سنة)، وليكن R_E نصف قطر مدار الأرض (أي الوحدة الفلكية التي نبحث عن قيمتها) وR_M نصف قطر مدار المرّيخ. عند وضع التعارض (أي الوضع الموافق لأقرب مسافة بين المريخ والأرض) يكون $R_M = R_E + d$، حيث d هي المسافة التي قاسها كاسّيني (Cassini) باستخدام طريقة البارالاكس مع المركب البحري في جنوب المحيط الهادي. باستخدام قانون كبلر الثالث نجد: $(T_M / T_E)^2 = (R_M / R_E)^3$، وبالتالي بالتعويض والحلّ نجد $R_E = d / [(T_M / T_E)^{2/3} - 1] = 1.91d$. لسوء الحظ ليس الأمر بهذه البساطة، لأنّ مدار المرّيخ قطع ناقص شديد، ويمكن لقيمة d أن تتغيّر بين 35 مليون مل (56 مليون كم) و63 مليون مل (100 مليون كم). يشير قانون كبلر إلى طول نصف القطر الكبير للمدار القطع ـ ناقصي، وكان على كاسّيني حساب هذا المقدار انطلاقاً من المعطيات الفلكية لديه. نحصل على الجواب الصحيح من خلال أخذ الوسطي بين أصغر قيمةٍ للمسافة الفاصلة عند وضع التعارض (مثل الوضع الذي اختبرناه في السنة 2003) وأكبر قيمةٍ لها، وهذا يعطينا القيمة 49 مليون ميل؛ وبذلك يكون (R_E = 1,91 x 49 = 92) مليون مل (148 مليون كلم).

ملاحظة وتمييز مثل هذا المقياس الزمني، لأنه من رتبة التأخّر الزمني الصغير الذي نحسّ به عندما نشاهد ونسمع حواراً بين مراسلَين صحافيَّين في مكانَين متقابلَين قطرياً على الأرض يتكلّمان من خلال الأقمار الاصطناعية. عندما حطّت مركبة أبولو على القمر أمكننا بوضوح أن نسمعَ ونشعر بالتأخّر الزمني أثناء تبادل الحوار بين روّاد الفضاء في المركبة وبين مركز المراقبة في هيوستون (Houston). تستغرق الإشاراتُ الضوئية هنا بين الأرض وبين الرّواد على مسافة 384,000 كيلومتر (240,000 ميل) بعيداً عنها ـ مع العلم أنّ هذه المسافة تتغيّر بحوالي 10 في المئة خلال كلّ شهر حيث إنّ مدار القمر هو قطعٌ ناقص ـ أكثرَ من $2\frac{1}{2}$ ثانية (وهو مقدارٌ كبير محسوس) لإتمام الرحلة ذهاباً وإياباً. لقد اكتشف رومر أنّ الضوءَ الذي نراه وارداً من الشمس يكون قد غادر سطحَها قبل حوالي ثماني دقائق، بينما يستغرق الضوء الذي نراه آتياً من أقرب نجم خارج منظومتنا الشمسية ـ بروكسيما سينتوري (القنطورَ القريب) (Proxima Centauri) ـ 3,8 سنة للوصول إلينا؛ ولذلك نقول إنّ نجمَ بروكسيما سنتوري يبعد 3,8 سنة ضوئية عن الأرض. يأخذ الضوء الصادر عن نجوم السماء اللامعة في الليل من 10 إلى 100 سنة تقريباً للوصول إلى الأرض؛ بينما يستغرق ضوء أبعد النجوم المرئية في الكون حوالي 12 مليار سنة ليصلنا. تمثّل هذه القيمةُ مقدارَ المسافة التي تفصلنا عن **أفق** الكون، لأننا بذلك نرى أيضاً كوننا في الماضي السحيق عند تشكّل أقدم النجوم وحتى المجرّات، بل إنّ هذا يعود بنا إلى بدايات الكون.

سرعة الضوء كما يراها المراقبون المتحرّكون

أطلقت القياساتُ الأولى لسرعة الضوء شرارةَ مناقشاتٍ أدّت في النهاية إلى نظرية النسبية الخاصة لإينشتاين بعد مئتي سنة. دارت

المناقشات حول السؤال التالي: ما الذي قسناه فعلاً هنا؟ هل قاس رومر سرعةَ الضوء الصادر من قمر المشتري إِيو؟ أم إنها كانت سرعة الضوء الصادر من الشمس ثمّ المنعكس عن إِيو المتحرّك؟ هل تأثّرت سرعة الضوء بحركة الأرض بالنسبة إلى إِيو؟

اتفّق غالبية العلماء على فكرة أنّ رومر كان يقيس سرعةَ الضوء خلال انتشاره ضمن شيءٍ مطلق - وسطٍ غير مرئي يملأ كامل الكون دُعي بـ «الأثير» - يتحرّك الضوء خلاله مثلما يتحرّك الصوت عبر الهواء. تعود فكرةُ وجود وسطٍ يتمّ ضمنه انتشارُ الضوء - أي ما يوافق الأثير - إلى الإغريق القدماء، وقد تمَّ إحياؤها وغدت مفهوماً أساسياً في عصر غاليليو. ومع ذلك فإن امتلاكَ القدرة على قياس سرعة الضوء المحدودة (رغم كونها مفرطة الكِبَر) فتح الآن صندوقَ باندورا[*] (Pandora) مليئاً بالأسئلة العلمية، إذ لو كان الضوء فعلاً ينتشر ضمن أثيرٍ ساكن يملأ أرجاء الكون، ولو كنّا نتحرّك ضمن الأثير من خلال وجودنا على سطح الأرض، فهل بإمكاننا كشفَ حركة الأرض من خلال ملاحظة تغيّراتٍ طفيفة في سرعة الضوء وفقاً لاتجاهات انتشاره المختلفة في الفضاء أو تِبعاً للأزمنة المختلفة خلال السنة.

من أجل الحصول على تحكّم أفضل بنتيجةِ أيّ عمليةِ قياسٍ فيزيائية، فإننا نحتاج في نهاية الأمر إلى جلب عملية القياس إلى الأرض، أي - بالحرف الواحد - أن نجريَ القياسَ في مخبرٍ موجودٍ **على الأرض**. يمكن للفيزيائي - في تجربةِ قياسٍ ضمن مخبرٍ موجودٍ

(*) منبعٌ لكثيرٍ من المشاكل، ويعود أصل التسمية إلى قصة صندوق أرسلته الآلهة إلى باندورا مع توصيةٍ بعدم فتحه، وعندما فتحته بدافع الفضول خرج كثيرٌ من الشرور على البشرية.

على الأرض ـ أن يعيّن موضعَي منبع الضوء وكاشفِه في جملة مقارنة ثابتة. ويمكن عندها إلغاء الارتيابات والآثار غير القابلة للتقييم التامّ بسبب حركة الكواكب في مداراتها، مثل الآثار الناجمة عن وجودِ سرعةٍ للمنبع أو للمستلِم بالنسبة إلى الضوء المتحرّك ومثل صعوباتِ إجراء قياساتٍ دقيقة وبشكلٍ متّسق طوال امتداد السنة الشمسية. على المرء هنا أن يتحلّى بالذكاء، لأنّ مقاييسَ المسافات على الأرض صغيرةٌ بحيث تغدو المشكلةُ متمثّلةً في قياس الأزمنة، أي تصبح مشكلةَ تحديدِ فتراتٍ زمنية قصيرة جداً وبدقة عالية.

في عام 1850، نجح عالِمان فرنسيّان رائدان ـ هما أرماند فيزو (Armand Fizeau) وجان فوكو (Jean Foucault) ـ بإجراء أول قياسٍ دقيقٍ غير فلكي لسرعة الضوء على كوكب الأرض. في البداية كان فيزو مهتماً على وجه الخصوص بمسألة إمكانية وجود قيم مختلفة لسرعة الضوء تبعاً للحالة الحركية للمراقِب أو منبع الضوء أو العاكِس. أمِل فيزو ـ في حال كون الضوء مماثلاً لموجةٍ صوتية تتحرك بسرعةٍ ثابتة ضمن الوسط الماديّ للأثير ـ أن يتمكّن من الحصول على قيم مختلفة لسرعة الضوء مع تحرّك الأرض النسبي بالنسبة إلى هذا الوسط. كان هذان العالِمان إذاً يبحثان أساساً عن الأثير.

طوّر فيزو آلةً ميكانيكية لقياس الأزمنة سُمّيَت بـ **الستروبوسكوب** (Stroboscope) تقدر على قياس الفترة الزمنية الصغيرة التي يستغرقها الضوء لاجتياز مسافةٍ معروفةٍ في المخبر. استخدمت طريقة فوكو ـ والتي كرّرها عدد من طلاب الفيزياء في أثناء دراساتهم ـ حزمةً ضوئية تنعكس عن مرآةٍ دوّارة. تنعكس الحزمة الضوئية لاحقاً عن مرآةٍ أخرى ثابتة متوضّعة بعيداً ـ على

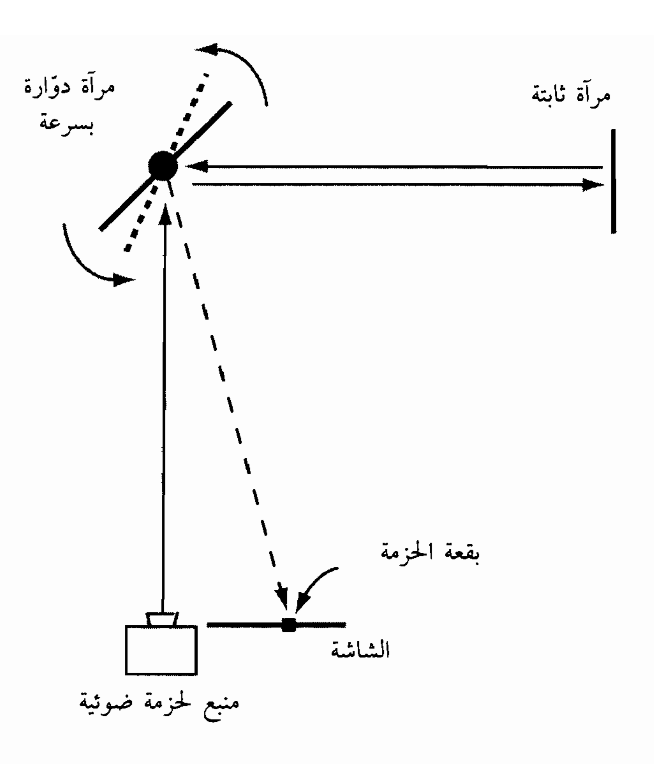
مسافةٍ معيّنة من المرآة الدوّارة ـ تقوم بعكس الحزمة لتعيدها نحو المرآة الدوّارة التي تعكسها بدورها إلى شاشة خاصّة. خلال الفترة الزمنية المحدَّدة الموافقة لانتقال الضوء من المرآة الدوّارة إلى المرآة الثابتة ثم عودته، تكون المرآة الدوّارة قد دارت قليلاً. وبذلك يتعلّق مقدار انزياح البقعة الضوئية على الشاشة بمعدّل سرعة دوران المرآة، ومن معرفة المسافة التي تفصل المرآتين بعضهما عن بعض ومعرفة مقدار معدّل الدوران، يمكننا حساب سرعة الضوء (انظر الشكل 13). أعطت مثل هذه التقنيات قيمةً لسرعة الضوء بدقة من رتبة 0.5+ في المئة.

ومع ذلك لم تكن طرق فيزو وفوكو كافيةً لكشفِ أيّ اختلافات محدَّدة في سرعة الضوء ناجمة عن حركة الأرض ضمن الأثير المحيط بكل شيء.

كان ألبرت أ. مايكلسون (Albert A. Michelson) في عام 1877 عالِماً شابّاً نشيطاً يعمل في الأكاديمية البحرية للولايات المتحدة في مدينة أنابوليس (Annapolis) في ولاية ماريلاند (Maryland). ابتكر مايكلسون نسخاً معدَّلة عن تقنيات الستروبوسكوبات هذه تسمح بإجراء قياساتٍ أدقّ بكثير لسرعة الضوء. كانت التجارب الأولى التي قام بها وهو في أوائل العشرينيات من عمره ناجحةً بشكلٍ مذهل، إذ أعطت لسرعة الضوء القيمةَ 299,909 كيلومتر في الثانية (186,355 مل في الثانية) بدقة 0.02+ في المئة، أي أدقّ بخمس وعشرين مرّة من نتيجة فوكو، ورغم ذلك كانت لا تزال غير كافية لرؤية أثر حركة الأرض ضمن الأثير. بسبب التغطية الإعلامية الكثيفة لكبرى الصحف في ذلك الحين غدا مايكلسون شخصاً مشهوراً بإنجازاته التجريبية عالية الدقة، فقرّر تكريس جلّ حياته لإجراء قياسات أدقّ لسرعة الضوء.

وتمكّن بعد ذلك بسنوات ـ بالتعاون مع إ. و. مورلي (E. W. Morley) ـ من تصميم منظومةٍ ضوئية قادرةٍ أخيراً ـ من حيث المبدأ ـ على كشف تأثير حركة الأرض على سرعة الضوء المنتشر ضمن الأثير. بعد محاولةٍ أولية في عام 1881 في برلين، تمّ إجراء التجربة المعدَّلة والمحسَّنة عام 1887 في الولايات المتحدة.

اعتمدت الإجرائية على ما ندعوه اليوم باسم **مقياس تداخل مايكلسون**. يقارن هذا الجهازُ البارع زمنَي مرور (مسير) الضوء في اتجاهَين متعامدَين بآنٍ واحد. تنقسم حزمةٌ ضوئية إلى حزمتَين تسيران بعدها في اتجاهَين متعامدَين أحدّهما على الآخر لتنعكسا عن مرآتين ثم تعودان معاً نحو عينيّة عدسات المجهر. تقتضي الطبيعة الموجية للضوء أنه في حال كان الفارق بين زمنَي المسير موافقاً لنصف طول موجة فإنّ الموجتَين الضوئيّتَين ستهدم إحداهما الأخرى، أما إذا كان فارق المسير الزمني موافقاً لطول موجةٍ كامل، فإنّ الموجتَين تتشاركان بشكل بنّاء بحيث تقوّي فيه إحداهما الأخرى. يعتمد الفارق في زمن المسير على الاختلاف في سرعة الضوء للحزمتَين عندما تسيران في الاتجاهَين المتعامدَين. وهكذا نرى من خلال عينيّة عدسات المنظومة الضوئية **عيّنةَ (نمطَ) تداخلٍ** لحزمتَي الضوء المجتمعتَين. نحاول بعدها رؤية تغيّراتٍ في عيّنة التداخل مع تدوير الجهاز في موضعه نسبةً إلى حركة الأرض الافتراضية عبر الأثير. كان على الجهاز في تلك الأيام أن يطفوَ فوق حوض مليءٍ بالزئبق السائل (وهو شديد السمّية) لإزالة أي آثار اهتزازية متأتّية من البيئة المحيطة. ليس بالإمكان إجراء مثل هذه التجربة اليوم في مخبر جامعةٍ نموذجية في الولايات المتحدة حيث يجب الالتزام بقواعد وكالة الحماية البيئية (EPA).



الشكل 13: تجربة المرآة الدوّارة لفوكو. يسمح قياسُ الانزياحِ إلى اليمين على الشاشة لبقعة الحزمة الضوئية العائدة ـ من أجل تواترٍ معروفٍ لدوران المرآة ومسافةٍ معيّنة تفصلها عن المرآة الثابتة ـ بحساب c سرعة الضوء.

ما الذي اكتشفته تجربة مايكلسون ـ مورلي؟ لا شيء. لقد أعطت التجربة نتيجةً سلبية! **لم** تجد التجربة **أيّ فرقٍ** في سرعة الضوء سواء أكان موازياً لاتجاه حركة الأرض أم متعامداً معه. لقد مثّلت هذه النتيجةُ السلبية صفعةً قويةً على وجه نظريّي الأثير، وخلقت التجربة لغزاً وأحجيةً مجهولة الحلّ. كيف ينتشر الضوء؟ لماذا ينتهك التوقّعات المنطقيةَ لغاليليو ونيوتن؟ ما الذي يجري هنا؟

من أجل تقدير مدى الصدمة التي مثّلتها تجربة مايكلسون ـ مورلي لفيزيائيي ذلك العصر، تخيّل فيزيائيتَين شابّتَين في المستقبل اسماهما جاكي وهيلاري تمتلكان أكثر الأجهزة حداثةً. تحمل كلتا الفيزيائيّتَين معها كاشفاً ـ مقياساً حديثاً ورقيقاً ـ بحجم مصباح الجيب ـ لسرعة الضوء، إنه من ابتكار شركة الأوج ويحتوي على داراتٍ متكاملة سيليكونية بدقةٍ تصل إلى أصغر من رتبة النانو ثانية وفيه حزمة ضوئية لِليزر الإيريديوم مع ساعةٍ ذرية هليومية مدمَجةٍ ضمنه. تقف جاكي على رصيف محطة قطار الرفع المغناطيسي، بينما تستقلّ هيلاري أحد القطارات السريعة التي تسير بسرعةٍ تصل لنصف سرعة الضوء.

اتفقت السيّدتان على أنه عندما تمرّ نافذة هيلاري في القطار أمام جاكي على الرصيف، فإنّ الأخيرة تطلق وميضاً ضوئياً من مصباح ضوئي لامعٍ موجودٍ على رصيف المحطة. تقوم جاكي بعدها باستخدام الكاشف ـ المقياس الذي معها بقياس سرعة فوتونات ضوء الوميض الصادر، وتقيس هيلاري في القطار باستخدام كاشفِها كذلك سرعةَ ضوء الوميض الصادر نفسه. تجتمع الشابّتان بعد ذلك بأيام لشرب القهوة، فتسأل هيلاري: «جاكي، قولي لي، ما هي قيمةَ سرعة الضوء التي قِستها في ذلك اليوم عندما مررتُ أمامك في القطار السريع بينما كنتِ واقفةً على الرصيف؟».

تجيب جاكي: «لماذا تسألين؟ وجدتُ القيمةَ ($c = 299,792,458$) متراً في الثانية تماماً، أي القيمة الاعتيادية لسرعة الضوء. وأنتِ، ماذا كانت نتيجةُ قياسِكِ؟». تردّ هيلاري: «همّمم، هناك شيءٌ غريب. لقد كان مقياس الأوج الذي معي يعمل بشكلٍ ممتاز، ومع ذلك فإن نتيجةَ قياسي كانت ($c = 299,792,458$) متراً في الثانية ـ نتيجتكِ نفسها ـ القيمة الاعتيادية لسرعة الضوء بدقة +1 متر في الثانية».

تستمرّ هيلاري في الكلام: «بالرغم من أنني كنتُ مسافرةً على متن القطار بسرعةٍ تعادل بالنسبة إليكِ نصف سرعة الضوء. أنا مندهشة من أنني قستُ قيمةً لسرعة الضوء مطابقةً لقيمة قياسِكِ أنتِ! كيف يمكن حدوث هذا الأمر؟».

في الواقع قام كلا المراقبَين بقياس القيمة نفسها تماماً لسرعة الضوء في الوميض الصادر نفسه، وبالتالي لا يوجد هنا جمعٌ وإضافة غاليليّة لسرعة القطار الذي يحمل أحدَ المراقبَين. كان جهازا القياس دقيقَين جداً (أكثر بكثير من جهاز مايكلسون ومورلي) لدرجةٍ كان عليهما معها إظهارُ اختلافٍ محسوسٍ عن القيمة الاعتيادية لسرعة الضوء في قطارٍ عالي السرعة، فما الذي يحدث هنا؟

مبدأ النسبية

كان غاليليو ـ كما ذكرنا سابقاً ـ هو من اكتشف مبدأ النسبية القائل **إنّ جميعَ حالات الحركة المنتظمة ـ والمدعوة بالمراجع أو جمل المقارنة العطالية ـ متكافئةٌ بالنسبة إلى وصف الظواهر الفيزيائية.** عندما نغيّر من حالتنا الحركية لننتهيَ في حالةِ حركةٍ أخرى مختلفة، فإنّ قوانين الفيزياء تبقى نفسها بالنسبة إلينا. يعبّر مبدأ النسبية عن تناظرٍ مستمر لقوانين الفيزياء، إذ إننا يمكن أن نغيّر وبشكل مستمرّ حركتَنا من حالةٍ إلى أخرى.

لنتخيّل رائدَ فضاءٍ في أعماق الفضاء السحيق. ولنفترض أنّ هذا الرائدَ سيّئ الحظ بحيث ضلّ طريقه وغدا بعيداً بمقدارٍ لامتناهٍ في الكبر عن جميع النقاط المرجعية كالنجوم والمجرات أو أيّ أجرام مرئية. لنفترض كذلك أنه ليس هناك ثقالةٌ ولا أشعةٌ كونية ولا أيُّ إشعاعٍ في الكون متبقٍّ من الانفجار العظيم: أي لا وجودَ لأيّ شيءٍ يمكنُ لرائد الفضاء قياسُه من أجل تحديد حالته الحركية، فرائد

الفضاء هذا ملقى في فضاء خالٍ تماماً وكاملِ الظلمة.

في أثناء تجوال مركبة الرائد في الفضاء، فإن كلَّ شيءٍ في داخلها ـ بما في ذلك أنابيب الطعام وخوذة الفضاء والهدايا والتذكارات وجميع الأجسام الأخرى ـ **ساكنٌ بالنسبة إلى الرائد.** يقول مبدأ النسبية إنه **لا وجودَ لتجربةٍ يجريها رائد الفضاء عديم الوزن** تقدر على كشف حالته الحركية. إذا ما شغّل رائد الفضاء محرّكاتِه النفّاثة وبدأ بالتسارع، فإنه سيشعر بدفعةٍ إلى الوراء في مقعده، ولكنه بعد إيقافه لمحرّكات النفث سيعود ليشعر بالعطالة وانعدام الوزن. **لا وجودَ لتجربةٍ يجريها رائد الفضاء** قادرة على اكتشاف أيّ اختلافٍ في قوانين الفيزياء بين **حالتَيه الحركيّتَين الأصلية والجديدة.** كلّ ما يمكن للمرء فعله هنا هو كشف **الحركة النسبية**: أي الحركة بالنسبة إلى علامةٍ ما أو منظومة مرجعيةٍ كالأرض أو الشمس أو نجمٍ بعيد مثل نجم ألفا أوريونيس (Alpha Orionis) أو أيّ شيءٍ آخر ـ ومنه تسمية **النسبية** ـ ولكن لا وجودَ لمثل هذه العلامات في الفضاء الخالي والمظلم.

هذا الوضع مماثلٌ لما رأيناه في التناظر الدوراني. لا وجودَ لاتجاهات مطلقة في الكون نحو الأعلى أو الأسفل أو إلى الجوانب أو نحو الأمام أو الخلف. يمكننا دوماً القولُ إن شيئاً ما قد دار **بالنسبة إلى شيءٍ آخر**، ولكن لا وجودَ لتوجيهٍ (اتّجاه دوران) مطلقٍ لأيّ شيءٍ في الكون. ومثلما نستطيع إجراءَ تحويلٍ دوراني نُدير به توجُّهَ جسمٍ ما إلى توجُّهٍ آخر، فإننا نستطيع كذلك إجراء تحويلٍ يغيّر الحالة الحَركية للجسم من حالةٍ إلى أخرى: عبر تشغيل محرّكات النفث الصاروخية لمركبة رائد الفضاء مثلاً.

ندعو التحويلات التي تغيّر سرعة المنظومة الفيزيائية من قيمة إلى أخرى بـ **المعزِّزات (عمليات الدعم).** نستطيع ـ حسب غاليليو ـ

تعزيزَ جسم ما في أيّ اتجاه في الفضاء ـ أي نعطيه دعماً ودفعةً جوهرية ـ لكي يبلغ قيمة السرعة التي نريد. عندما يستعمل رائد الفضاء صواريخه النفّاثة، فإنه يطبّق تحويلاً معزِّزاً على نفسه وعلى مركبته الفضائية. وبذلك يُعَدّ عدمُ تغيّر المنظومة الفيزيائية ـ أو قوانين الفيزياء ـ عند إجراء المعزِّزات عمليةً تناظرية: تماماً كما يُعتبَر تدويرُ كرةٍ ما عمليةً تناظرية، ولكنّ غاليليو كان في ذهنه أيضاً مفهومٌ أساسي آخر وهو «مبدأ الزمن المطلق»: **يجب على جميع المراقبين ـ بقطع النظر عن كيفية تحرّكهم في الفضاء ـ أن يجدوا القيمةَ نفسَها للفترة الزمنية الفاصلة بين أيّ حادثتَين.** يُعتبَر هذا المبدأ تصريحاً عن تناظر الزمن، فالزمن وفقاً له سيكون لامتغيّراً عند إجراء المعزِّزات.

لقد كان مفهومُ الزمن المطلق غاية في الأهمية لجميع مجالات الفيزياء منذ عصر غاليليو حتى أيام إينشتاين. مع ذلك فإنّ هذا المبدأ ـ كما سنرى ـ هو القطعةُ الأساسية من الأمتعة التي تخلّص منها إينشتاين، إذ بيَّن أنّ مبدأ الزمن المطلق **خاطئ!**

الإطاحة بنسبية غاليليو

إنّ العالَم الفيزيائي عبارة عن نسيجٍ من الحوادث، وهذه الأخيرة هي أشياءٌ تحدث في مواضعَ من المكان وعند لحظاتٍ من الزمن محدّدةٍ بدقّة. إذا ما أُعطينا حادثتَين بإحداثياتٍ معروفة، فإنه يمكن حساب المسافة الفاصلة L والفترة الزمنية T بينهما. على سبيل المثال إذا تمّت الحادثتان على محورِ سيناتٍ تخيّلي ـ الحادثة الأولى حصلت في x_1 والأخرى عند x_2 ـ فإن المسافة الفاصلة بينهما هي $L = x_2 - x_1$. وبطريقة مماثلة إذا أخبرتنا ساعتُنا أنّ الحادثةَ الأولى قد تمّت في اللحظة t_1 بينما تمّت الحادثة الثانية في اللحظة t_2، فإنّ الفترة الزمنية الفاصلة هي $T = t_2 - t_1$. لنفترض الآن وجودَ مراقبٍ

آخرَ شاهد نفس الحادثتَين، ولكنه يتحرّك بالنسبة إلينا بسرعة v في الاتجاه المنطلق من الحادثة الأولى ـ 1 ـ إلى الحادثة الثانية ـ 2 ـ. ماذا سيقيس هذا المراقب كمسافةٍ فاصلة وكفترةٍ زمنية بين الحادثتَين[6]؟ أعطانا غاليليو إجابةً موافقةً لإجراءِ معزِّز غاليله[7]:

---

(6) من أجل تبسيط المناقشة حول استعمال منظومتَي إحداثيات مختلفتَين من قبل مراقبَين مختلفَين سنتّفق على استخدام واحدات القياس نفسها في كلا المنظومتَين. سنتّفق كذلك ـ على الأقلّ عند البداية ـ على أنّ محاور منظومتَي الإحداثيات **متوازية**. يعني هذا أننا نتّفق على جهات محاور الـ x والـ y والـ z، وأنّ كلا المراقبَين يعتمدان هذه الاصطلاحات. عندما نتكلّم عن الزمن فإننا ـ إضافةً إلى ما سبق ـ نريد لساعاتنا أن تكون متواقتة، أمّا عندما نتحدّث عن الحركة فإننا سنفترض في بعض الأحيان أنّ منظومتَي الإحداثيات كانتا متطابقتَين في لحظةٍ خاصّة من الزمن: لنقُل إنها اللحظة الابتدائية t=0؛ حين تموضع مراقب «غير متحرّك» (مراقب ساكن) وآخر «متحرّك» في المكان نفسه وليكُن المبدأ. ما يسمح لنا بذلك هو مجرّد إجراء انسحابات في الزمان والمكان، وهي تناظرات فيزيائية. لسنا مُلزَمين بإجراء هذا النوع من «المعايرة»، ولكنه غالباً ما يكون مفيداً. سوف تتحرّك منظومة إحداثيات المراقب المتحرّك معه، أمّا منظومة إحداثيات المراقب غير المتحرّك فتبقى ثابتة.

(7) بشكل عام تكون قوانين التحويل الموافقة لمعزِّز غاليليو هي التالية: $x' = x - vt, y' = y, z' = z$ و$t' = t$، من أجل حركة بموازاة محور الـ x. بما أنّ هذا تحويلٌ لتناظر مستمرّ، فهناك قانون مصونية موافق ليس من الصعوبة تعيينه؛ انظر: E. L. Hill, «Hamilton's Theorem and the Conversation Theorems of Mathematical Physics,» *Review of Modern Physics*, vol. 23 (1953), p. 253.

هناك ثلاثة اتّجاهات نستطيع تعزيزَ (دعمَ) جسم ما وفقها، وبالتالي يتوجّب على الكمّية المصونة أن تكون شعاعاً. لنأخذ منظومةً تحوي عَدداً كبيراً من الكتل m_a. نعرّف **الموضعَ الكتليّ** للمنظومة $\vec{Q} = \sum m_a \vec{r_a}$ وهو مجموع أشعة الموضع لكلّ جسيم في المنظومة مضروباً بكتلته (هذه الكمية ذات صلة بما ندعوه مركز ثقل المنظومة المعرَّف بـ$\vec{X} = (\sum m_a \vec{r_a}) / (\sum m_a) = \vec{Q}/M$، حيث $M = \sum m_a$ الكتلة الكليّة للمنظومة). يُعرَّف كذلك الاندفاع الكليّ للمنظومة بالعلاقة $\vec{P} = \sum m_a \vec{v_a} = \vec{Q}$، وهو مصون $\vec{P} = 0$ اعتماداً على اللاتغيّر (الصمود) الانسحابي. عندها تكون الكمّية المصونة النوثرية الموافقة للمعزّزات هي الشعاع $\vec{K} = \vec{Q} - \vec{P}t$، حيث نرى بسهولة أنها مقدار مصون $\vec{K} = 0$. تقتضي هذه المصونية أن يتحرّك مركز ثقل المنظومة في المكان بسرعة ثابتة. يقود اشتقاقٌ أكثرُ عموميةً وتفصيلاً إلى النتيجة القائلة إنّ **مركز** ثقل منظومة ما سوف يتحرّك بسرعة ثابتة من أجل أيّ إجرائية (عملية) فيزيائية داخلية.

$$L' = L - vT, T' = T$$

هذا ما يُدعى بـ **تحويل غاليليو**، حيث تدلّ المعادلة الثانية منه على التعبير الرياضياتي عن **الطبيعة المطلقة للزمن**، أما المعادلة الأولى فتبيّن كيفيةَ تأثير الحركة النسبية على المقارنة بين القياسَين - اللذين تمّ القيام بهما في مرجعَين متحرّكين نسبياً في ما بينهما - للمسافة الفاصلة بين نفس الحادثتَين. تمثّل تحويلاتُ غاليليو تناظراً مستمراً، لأنّ السرعة v التي يمكن تعزيزُ ودفعُ مرجعٍ بمقدارها يمكن لها أن تأخذ قيماً مختلفة عن بعضها بشكل مستمر (لا متقطّع). ليس من الصعب إثبات أنّ تحويل غاليليو يقتضي أنّ سرعة أيّ شيءٍ - **بما في ذلك الضوء** - تتغيّر بالنسبة إلينا عندما نلاحقه ونركض وراءه. إضافةً إلى ذلك يمكن القيام بمعزِّز غاليليو بسرعةٍ v مهما كانت قيمتها، أي لا وجودَ في الفيزياء التقليدية لحدٍّ أعلى لقيمة السرعة النسبية بين مراقبَين، ويمكن لها أن تفوق سرعة الضوء بعدة مرّات.

إذا كان قِطّي أوليي (Ollie) الممثِّلُ لجملة مقارنة عطالية يهرب مني بمعدّل سرعةٍ عالٍ وفي فمه هَمْستري(*) المدلَّل آرلو (Arlo)، فإنني سأحاول تعزيزَ ودعمَ نفسي بدفعةٍ نحوَ جملةٍ مرجعية يمكنني خلالها أن أسبق أوليي وأستردّ آرلو. إذا كان أوليي يسير بسرعة v بعيداً عني وقمتُ بتعزيزٍ ودعم على حالتي لتصل سرعتي إلى 'v في اتجاه أوليي، فإنني سوف أرى أوليي يهرب مني بسرعة 'v-v. إذا كانت 'v كبيرةً بشكلٍ كاف، يمكنني أن آمل باللحاق بركبِ أوليي وإنقاذ آرلو في اللحظة الأخيرة. كلّ هذه الأمور مسموحٌ بها في فيزياء غاليليو ونيوتن التي هي على توافقٍ مع تجارب الحياة اليومية.

(*) الهَمْستر (Hamster): حيوانٌ قارض شبيه بالجرذ.

لقد كان المدلولُ الثوري لتجربة مايكلسون ـ مورلي هائلَ الأهمية، حيث بيّنت التجربة أنّ $c = c'$ مهما بلغت سرعتُنا في محاولتنا اللحاقَ بالإشارة الضوئية. مثّلت هذه النتيجةُ بالفعل صدمةً كبيرةً كانت ستقيم غاليليو من قبره، إذ من المستحيل حقاً مصالحتُها مع شكل تحويل غاليليو بين مرجعَين عطاليَّين، وهي تبدو غيرَ منطقيةٍ تنطوي على تناقضٍ ظاهري.

لنتناول مرة أخرى حالةَ أوليي الهارِب بسرعةٍ عاليةٍ جداً وآرلو في فمه. إذا استطاع أوليي بطريقةٍ ما بلوغَ سرعة الضوء في هروبه مني، فعندها ـ مهما كانت سرعتي راكضاً خلفه ـ لن أستطيع البتّة اللحاق به، أو حتى تغيير السرعة التي يبتعد بها عنّي! لذلك عليّ قطع الأمل بإنقاذ آرلو المسكين. من الواضح أنه لدينا هنا مفارقة، وأعني $(c - v = c)$ مهما كانت v! ولكن كيف يمكن لهذا أن يكون صحيحاً؟ يجب أن تكون قوانينُ الطبيعة متّسقةً رياضياتياً، وهذه النتيجةُ المشابهة لقولنا بأن $(4 - 3 = 4)$ منافيةٌ للعقل ظاهرياً.

حاول بعض الفيزيائيين الاحتجاجَ بأنّ الأثير موجودٌ فعلاً، ولكنّ هناك آثاراً ديناميكة حذقة ترتبط بالتحرّك فيه، وحدوث تلك الآثار هو الذي غيَّر نتائجَ القياس بطريقة منسجمة مع نتيجة تجربة مايكلسون ـ مورلي. ناقش هندريك لورنتز (Hendrick Lorentz) وجورج فيتزجيرالد (George Fitzgerald) فكرةَ سحب الأثير لجميع الكائنات الفيزيائية وجرِّها معه بحيث إنّ الأطوالَ في اتّجاه الحركة تَقصُر أو تتقلّص. يسبّب هذا أيضاً تباطؤَ الساعات بحيث يقود كلّ ذلك إلى نوعٍ من «المؤامرة» تجعل جميعَ المراقبين المتحرّكين يقيسون القيمَةَ نفسها c لسرعة الضوء مهما كانت سرعاتهم. لقد كانت تلك الحجج مضلّلة وأساسها المنطقي التحتي لم يكن إلاّ محاولةً لإنقاذ الأثير، ولكنها مثّلت نقطةَ البداية للنظرية الجديدة عن النسبية الخاصة.

نسبية إينشتاين

كان ألبرت إينشتاين هو من حلّ الأحجية في السنوات الأولى من القرن العشرين. في عام 1905 حطّم هذا الشابّ ذو الستة والعشرين عاماً والموظّف في مكتب براءات الاختراع في مدينة برن في سويسرا والمعتاد على التفكير وهو يهزّ أرجوحة ـ سرير الطفل مجملَ البناءِ الغاليليّ والنيوتني للفيزياء التقليدية، وذلك من خلال ضرباتٍ واسعةٍ عميقةٍ وخادعةٍ في بساطتها الظاهرية. لقد قلبَ مفهومُه الجديد عن المكان والزمان فهمَنا للطبيعة بشكلٍ كامل، وقادنا إلى الفيزياء الحديثة. مثّل إنجازُه هذا ـ ولا يزال يمثّل ـ أحدَ أروع إنجازات العقل البشري، ولقد كان مبنياً تماماً على التفكير بالطبيعة من خلال منظار التناظر.

ما دفع إينشتاين إلى ابتكار النسبية الخاصة هو تفكيره بدلالة المبادئ التناظرية التي حكمت سلوكَ الضوء كما كان مفهوماً في أواخر القرن التاسع عشر. في الحقيقة يُعدّ هذا الأمر ـ بشكلٍ ما ـ أعظمَ ما قدّمته لنا بصيرة إينشتاين. لقد غيّر إينشتاين جذرياً من **الطريقةِ** التي كان يفكّر بها الناس حول الطبيعة، فابتعد عن وجهة النظر الميكانيكية للقرن التاسع عشر نحو التأمّل الأنيق في المبادئ التناظرية التحتية لقوانين الفيزياء في القرن العشرين.

اعتمد إينشتاين الفرضيةَ الأساسية في أننا سنجد دوماً الضوءَ يتحرّك بالسرعة الثابتة نفسها مهما أوتينا من جهد في محاولة اللحاق به[8]. لنُصِغ لذلك من خلال لغة التناظر فنقول إنّ **سرعة الضوء**

---

(8) Albert Einstein, «On the Electrodynamics of Moving Bodies,» *Annalen der Physik*, vol. 17 (1905), pp. 891-921 [in German].

أعيد طبعها في: *The Principle of Relativity* (New York: Dover, 1952), pp. 35-65.

تمّ لاحقاً تسليط الضوء على الدور المبهم الذي أدته زوجة إينشتاين الأولى ميليفا =

لامتغيّرة بالنسبة إلى جميع المراقبين. لنتذكّرْ أنّ التناظر يعبّر عن شيءٍ لا متغيّر بالنسبة إلى تحويلٍ ما، وما يطلبه إينشتاين هو لا تغيّر سرعة الضوء عند إجراء المعزِّزات (بينما ما كان غاليليو يطلبه سابقاً هو أن تبقى الفترةُ الزمنية بين حادثتَين نفسَها بالنسبة إلى جميع المراقبين). تقوم نظرية النسبية الخاصة لإينشتاين إذاً على مبدأين:

- مبدأ النسبية: **جميع حالات الحركة المنتظمة** ـ والتي تُدعى بجمل المقارنة العطالية ـ متكافئة في ما بينها في ما يخصّ وصفَ الظواهر الفيزيائية.

- مبدأ ثبات سرعة الضوء: **جميع المراقبين سوف يحصلون على القيمة نفسها لسرعة الضوء بواسطة أيّ تجربةِ قياسٍ يجرونها في أي جملة مقارنة عطالية.**

المبدأ الأول مستعارٌ ببساطة من غاليليو، بينما المبدأ الثاني هو نتيجةٌ لتجربة فعلية (تجربة مايكلسون ـ مورلي) يتمّ فرضُها الآن كمبدأ تناظريٍ **جديد** يُطبَّق على الطبيعة. لقد تخلّينا هنا عن المفهوم الضمني لغاليليو عن الزمن المطلق، وتبعنا إينشتاين الذي يطلب أن يكون المبدآن صحيحَين ومتعايشَين معاً من دون أيّ تناقض بينهما. لا بأس أن نذكر في هذا السياق ـ وعلى نحوٍ عرضي ـ أنه من الممكن ألاّ يكون إينشتاين ـ الذي ركّز على التناظرات المتأصّلة في بنية النظرية الرياضياتية للإلكتروديناميك ـ قد تأثّر بنتيجة تجربة مايكلسون ـ مورلي، وربّما لم يكن ملمّاً بتفاصيلها في الوقت الذي أوجد فيه النسبيةَ الخاصة.

= ماريتش (Mileva Maric) في تطوير النسبية الخاصة، وخضع لفحص وتمحيصٍ دقيقَين. للأسف يلوّث مصيرُ ميليفا المأسوي ويقلّل نوعاً ما من بريقِ الصورة الهادئة الطيّعة والحكيمة الأبويّة لشخص إينشتاين العظيم. انظر: «Einstein's Wife: The Life of Mileva Marić Einstein,» www.pbs.org

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 4 حزيران/ يونيو 2004).

يمكن النظر إلى مبدأَي النسبية الخاصة هذين بطريقة أنيقة ووجيزة نعرضها في ما يأتي: يتضمّن تناظر النسبية الخاصة مفهوماً هندسياً كاملَ الجدّة لـ «المسافة» بين حادثتَين اثنتَين. تُدعى هذه المسافة الجديدة باسم «**الفاصل أو المجال اللامتغيّر**». يتضمّن هذا الفاصل اللامتغيّر الاختلافَ والفاصلَ في الزمن بين الحادثتَين بالإضافة إلى الاختلافِ والفاصلِ بينهما في **المكان**.

لنأخذ حادثتَين 1 و2. هناك فاصلٌ مكاني L وفاصلٌ زماني T بينهما في جملة مقارنةٍ معطاة سندعوها اصطلاحاً باسم «المرجع الساكن». يُرمز للفاصل ـ المجال اللامتغيّر بين هاتين الحادثتَين بالحرف اليوناني t (تاو) ويُعرَّف بالصيغة البسيطة: $\tau^2 = T^2 - (L/c)^2$ هناك وجه شبهٍ كبير بين هذه الصيغة ونظرية فيثاغورس في الهندسة. في مثلث قائم الزاوية طولا **ضلعيه القائمَين** x وy، يحقّق طولُ **الوتر** z العلاقةَ: $z^2 = x^2 + y^2$ (أو لدينا: «مربّع الوتر يساوي مجموع مربّعَي الضلعَين القائمَين»؛ وهو قولٌ يتذكّره محبّو السينما عندما يستعيدون المشهد الذي أنعم فيه ساحر الـ Oz على الفزّاعة بشهادة تقدير وليس بعقلٍ ذكي. تقترح النسبية الخاصة لإينشتاين في الواقع نوعاً جديداً من الهندسة لاجتماع المكان والزمان ـ أو ما يُدعى اليوم باسم الزمكان ـ حيث يكون الوترُ هو الفاصل اللامتغيّر t، أما الضلعان القائمان فيكون أحدُهما الفاصلَ الزمني بين الحادثتين T بينما يكون الآخرُ الفاصلَ المكاني بينهما L مقسوماً على سرعة الضوء c. ولكن هناك الآن سمةٌ جديدةٌ ملتويةٌ وفائقةُ الأهمية في هندسة إينشتاين: يدخل القسم المكاني $(L/c)^2$ بإشارةٍ سالبة في صيغة فيثاغورس الجديدة، بينما يبقى القسم الزماني T^2 محافظاً على إشارته الموجبة. وهذا الأمر يحدث لأنّ الزمان ـ كما نعرف من التجربة ـ مختلفٌ عن المكان.

الآن سوف يقيس مراقبون مختلفون يتحرّكون بالنسبة إلى المرجع الساكن بسرعة v قيمةً مختلفة، 'T للفاصل الزمني بين الحادثتين وقيمةً أخرى كذلك، 'L للفاصل المكاني. ومع ذلك ينصّ تناظر إينشتاين الجديد على أنّ الفاصلَ اللامتغيّر بين عضوَي أيّ زوج من الحوادث t^2 يبقى نفسَه بالنسبة إلى جميع المراقبين بغضّ النظرَ عن كيفية حركتهم. يعني ذلك أننا لو حسبنا t^2 بدلالة L وT ثم حسبناه بدلالة 'L و'T لحصلنا على القيمة نفسها. في الحقيقة يمكننا دمج كلا مبدأَي إينشتاين التعريفيَّين للنسبية في مبدأ تناظرٍ واحد وفعّال: **يبقى الفاصل اللامتغيّر بين أيّ حادثتَين نفسَه بالنسبة إلى جميع المراقبين بغض النظر عن حالاتهم الحركية بالنسبة إلى بعضهم بعضاً.**

إذا وقعت الحادثتان في الموقع نفسه من المكان كان الفاصل المكاني بين الحادثتَين في المرجع الساكن مساوياً للصفر $L = 0$، وبالتالي يغدو الفاصل اللامتغيّر ببساطة $t = T$. يعني ذلك أنّ الفاصلَ اللامتغيّر هو **الفترة الزمنية المنصرمة فعلاً في ساعةٍ** تكون الحادثتان ساكنتَين بالنسبة إليها. نطلق غالباً على الفاصل اللامتغيّر تسميةً أخرى: **الفاصل الزمني الصرف** بين الحادثتين.

من ناحية أخرى، إذا ارتبطت حادثتان في الزمكان عبر إشارة ضوئية ـ كأن تكون وميضاً ضوئياً من حادثةٍ موافقةٍ لمنبع يصدر الضوء إلى حادثةٍ موافقةٍ لمستلم يتلقّاه ـ فإن الفاصلَ اللامتغيّر (أو الفاصلَ الزمني الصرف) بين الحادثتَين يكون معدوماً: $t = 0$. بما أنّ هذه القيمةَ المعدومةَ تبقى نفسَها من أجل جميع المراقبين، يستنتج هؤلاء إذاً أنّ سرعةَ الضوء تبقى نفسَها لا تتغيّر من مراقبٍ إلى آخر مهما كانت السرعة التي يتحرّكان بها.

سأل إينشتاين نفسه: «ما هي المعزِّزات التي تحافظ على قيمة الفاصل اللامتغيّر t (فتجعله صامداً لامتغيّراً) بالنسبة إلى جميع المراقبين؟» وجد إينشتاين عند أخذه بعين الاعتبار وضعَ مراقبٍ يتحرّك بالسرعة v مبتعداً عن الحادثة 1 ومتجّهاً نحو الحادثة 2، أنّ ما يلاحظه هذا المراقب من فارقٍ زمني T' وفارقٍ مكاني L' بين الحادثتَين يرتبطُ مع قيمتَيهما T وL في المرجع الساكن عبر ما ندعوه بـِ «معزِّزات إينشتاين»(9):

$$L' = \gamma (L - vT), T' = \gamma (T - vL/c^2)$$

حيث يُعطى العامِلُ الرياضياتي الجديد g ـ الذي يُدعى بِغاما أو **عامِل لورنتز** ـ بالعلاقة:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

وهو يتغلغل في كلّ شيءٍ في النسبية الخاصة.

قد يكون أمراً شاقّاً النظرُ إلى الصيغ الرياضياتية، أما التعامل معها فهو بالتأكيد أمرٌ أكثر مشقّةً. مع ذلك ليس من الصعوبة ـ

(9) يُعَدّ هذا نسخةً مبسّطةً عن معزِّز إينشتاين، وليس الشكل العام للمعزِّزات. في الواقع يمكن للمراقب المتحرّك أن يتحرّك في أيّ اتّجاه بالنسبة إلى الحادثتَين. تكلّمنا كذلك عن الفواصل الزمنية والمكانية الفاصلة من أجل تجنّب المناقشة الأطول بخصوص منظومات الإحداثيات، ولكنّ هذه الأخيرة تقدّم لنا لغةً أكثر عموميةً لصياغة النتائج بدلالتها. يصف المراقبُ الساكن الحوادثَ على أنها نقاطٌ في زمكانٍ موسوم بأربعة إحداثيات (x,y,z,t)، بينما يحمل المراقبُ المتحرّك منظومةَ إحداثيات (x',y',z',t') «متحرّكة معه». تربط معزِّزاتُ إينشتاين الموافقةُ لسرعةٍ نسبيةٍ v في الاتجاه الموجب لـ x y بين هذه الإحداثيات على الشكل التالي:

$$x' = \gamma (x - vt), y' = y, z' = z, t' = \gamma (t - vx /c^2)$$

حيث $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$.

تصبح هذه الصيغُ قوانينَ التحويل الموافقةَ للمعزِّزات بدلاً من تلك الموافقة للمعزِّزات الغاليليّة في الهامش 7.

باستخدام الصيغ المذكورة أعلاه وتطبيق قليلٍ من التقنيات الحسابية الموافقة لمستوى المرحلة الثانوية ـ الاستنتاجُ بأنّ لدينا: $T'^2 - (L'/c)^2 = T^2 - (L/c)^2$ [10]. يؤكّد ذلك أنّ الفاصلَ اللامتغيّر ـ أو الزمن

(10) نستطيع ـ وبقليل من الحسابات ـ التحقّق من أنّ الفاصل اللامتغيّر يبقى نفسه من أجل كلا المراقبَين:

$$\tau^2 = T'^2 - L'^2 / c^2 = \gamma^2 (T - vL/c^2)^2, [\gamma^2 (L - vT)^2]/c^2 = T^2 - L^2/c^2$$

حيث $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$.

وبذلك يكون الفاصل ـ أو الزمن الذاتي ـ لا متغيّراً بالنسبة إلى المعزِّزات. وبدلالة لغة الإحداثيات إذا أُعطينا حادثتَين 1 و2 يكون الفاصل بينهما مساوياً لـ:

$$\tau^2 = (t_1 - t_2)^2 - \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right] / c^2$$

حيث c سرعة الضوء. وبالمقابل سوف يكتب المراقب المتحرّك:

$$\tau^2 = (t_1 - t_2)^2 - \left[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2\right] / c^2$$

يحافظ تحويل لورنتز على هذا الفاصل اللامتغيّر لأنّ:

$$\begin{aligned}\tau^2 &= t'^2 - \left[x'^2 + y'^2 + z'^2\right] / c^2 \\ &= \gamma^2 \left(t - Vx / c^2\right)^2 - \left[\gamma^2 (x - Vt)^2 + y^2 + z^2\right] / c^2 \\ &= t^2 - \left[x^2 + y^2 + z^2\right] / c^2\end{aligned}$$

ضمن لغة الزمر (انظر الملحق) يُعتبر هذا التناظر مماثلاً لـ (4) SO أي تناظر الكرة رباعية الأبعاد. في المستوي x-y يمزج الدورانُ العادي بين قيمتَي الإحداثيَين x وy عبر عوامل ضربية مثل $\cos(\theta)$ و$\sin(\theta)$. تُعتبر تحويلات لورنتز الموازية للمحور x مثل الدورانات التي تجعل x وct متمازجتين بواسطة عوامل ضربية γ و$-\gamma V/c$. لاحظ أنه بينما كان لدينا في حالة الدوران: $\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1$، فإنه لدينا الآن: $\gamma^2 - (-\gamma V/c)^2$. يكمن الاختلاف بين تحويلات لورنتز وبين الدورانات العادية في أربعة أبعاد بوجود إشارة الناقص في تعبير الزمن الصرف والتي تسمح بتمييز الزمان عن المكان. نعرّف زمرة التناظر الموافق بأنها (1,3) SO، ويعني ذلك أنه بينما (4) SO هي مجموعة التحويلات على الإحداثيات الأربع (x,y,z,t) التي تُبقي نصف قطر الكرة الواحدية $x^2 + y^2 + z^2 + w^2 = 1$ صامداً لا متغيّراً، فإنّ (1,3) SO هي مجموعة التحويلات على الإحداثيات الأربع التي تُبقي المقدار $-x^2 - y^2 - z^2 + w^2 = 1$ صامداً لا متغيّراً. وهذه زمرة تناظرٍ مستمرٌ تُدعى بـزمرة **لورنتز**.

الصرف ـ هو نفسه **بالنسبة إلى كلا المراقبَين** المرتبطَين ببعضهما عبر معزِّزٍ لإينشتاين. لقد صمّم إينشتاين عن قصد صيغَ معزِّزِه بالشكل المذكور أعلاه بالذات من أجل تحقيق هذا الهدف بالذات. تمثّل معزِّزات إينشتاين التحويلات التناظرية الصحيحة ـ للفترات الزمانية وللفواصل المكانية ـ بين المراقِبين المختلِفين المتحرّكِين بالنسبة إلى بعضهم بعضاً، وبالتالي فهي التي تحلّ محلّ معزِّزات غاليليو.

تختلف معزِّزات إينشتاين عن معزِّزات غاليليو في أمرَين مهمَّين. أولاً: هناك الـ g الكلّي الوجود ـ عامِل «غاما» أو «عامِل لورنتز» ـ الضروري لإبقاء الفاصلِ بين أيّ حادثتَين لا متغيّراً، فهو يضمن أنّ وميضاً ضوئياً ما سوف يُرى من قِبل أيِّ مراقبٍ ـ مهما كانت سرعته v ـ منتشراً نحو الفضاء بشكلٍ كروي وبسرعةِ الضوء. ثانياً: نرى الآن أنّ الزمان لم يعد مطلقاً، فالزّمان والمكان يمتزجان معاً عندما نتحرّك بالنسبة إلى بعضنا بعضاً ويتوقّف الزمان عن كونه مطلقاً.

إضافةً إلى ذلك يمكننا أن نرى أنه من أجل سرعاتٍ منخفضة (أي عندما تكون v أصغرَ بكثير من c)، فإنّ معزِّزات إينشتاين تقترب في شكلها من معزِّزات غاليليو $L' = L\text{-}vT$ و $T' = T$. تكون الاختلافات إذاً بين معزّزات غاليليو الصرفة ومعزِّزات إينشتاين صغيرةً جداً من أجل سرعاتٍ منخفضة؛ وبالتالي تغدو النسبية الخاصة تصحيحاً غيرَ قابلٍ للملاحظة من أجل الأجسام المتحرّكة ببطء. يمكن رؤية هذا الأمر من منظارٍ آخر في أنه إذا اعتبرنا سرعةَ الضوء لامتناهية في الكبر فإنّ معزّزات إينشتاين تتنبّأ كذلك بـ $T' = T$ أي نحصل من جديد على الزمن المطلق! يبيّن كلُّ هذا أنه من أجل المراقبين المتحرّكين ببطء تمثّل نسبيةُ غاليليو طريقة تقريبية ممتازة مقبولة تماماً. ومع ذلك لا يمكن إتمامُ مصالحةٍ تامّةٍ بين مفهوم الزمن المطلق وبين تجربة مايكلسون ـ مورلي إلاّ إذا كانت سرعة الضوء لامتناهية في الكبر!

يمكننا أن نتخيّل الفاصلَ اللامتغيّر بين حادثتَين اثنتَين على أنه طولُ مؤشّرة الحوادثِ لشركة الأوج في قاعةِ الصف الزمكانية. يبدأ طول مؤشّرة الحوادث عند مقبضها المتوضّع في حادثةٍ زمكانية (1)، وينتهي عند «رأس قمّتها» الواقع في حادثةٍ زمكانية أخرى (2). تشبه معزِّزات إينشتاين نوعاً من «الدوران» في الزمكان، حيث يبقى طولُ المؤشّرة ـ أي **الفاصل اللامتغير** بين حادثتَيها ـ ثابتاً لا يتغيّر، حالُه في ذلك مطابقٌ تماماً لحال الدوران العادي في المكان الذي يحافظ على طول مؤشّرة قاعةِ صفّ عادية. ضمن هذا المعنى تشبه المعزّزاتُ التي تنجم عنها حالاتٌ حركيةٌ مختلفةٌ الدوراناتِ التي تتمّ في المكان الاعتيادي.

كان لورنتز ـ من الناحية التاريخية ـ هو أول من اشتقّ الشكل الرياضياتي للمعزِّزات، وذلك عندما طرح فكرةَ جرّ الأثير للكائنات الفيزيائية ضمنه قبل عدة سنين من إينشتاين، ولهذا تُدعى معزِّزات إينشتاين باسم **تحويلات لورنتز**، ولكنْ ببساطة الأثيرُ غير موجود، ونحن ننظر اليوم إلى تحويلات لورنتز (معزّزِات إينشتاين) على أنها تحويلات تناظرية صحيحة وحقيقية لقوانينِ الفيزياء بالنسبة إلى الحركة: إنها تحويلات التناظر الذي يحقّق مبدأَي إينشتاين التعريفيَّين.

الآثار الغريبة للنسبية الخاصة

تنجم عن النسبية الخاصة ظواهر وآثار غريبة فعلاً، وسنشرح ذلك في ما سيأتي.

لنفترض أن لدينا جسمين تفصل بينهما مسافة L في المرجع الساكن، فما هي المسافة الفاصلة بينهما بالنسبة إلى مراقبين متحرّكين؟ من خلال تحليلٍ دقيق لعملية قياسِ طولِ كائنٍ يقع بين كائنَين آخرَين (يجب أن يحدّد المرء عند قيامه بهذا القياس موضعَي

طرفَي الكائن في اللحظة نفسها)، نجد أن المسافة الفاصلة التي يراها المراقب المتحرّك هي $L'=L\sqrt{1-v^2/c^2}$[11]. يرى المراقبون

---

(11) لكي نفهم تقلّص الأطوال دعونا نسأل ما هي قيمة المسافة الفاصلة بين الحادثتَين التي يقيسها في جملة مقارنتهم (مرجِعهم) المراقبون المتحرّكون. سيقيسون في الحقيقة فاصلاً مكانياً L' وفترة زمنية فاصلة T' بين الحادثتين، حيث $L'=\gamma(L-vT), T'=\gamma(T-vL/x^2)$. مع ذلك عندما نقيس **طول جسم ما** فإننا يجب أن نقيس المسافةَ الفاصلة بين الحادثتَين المتموضّعتَين عند نقطتَي طرفَيه **والمتواقتتَينَ** بالنسبة إلينا، وبالتالي يصرّ المراقبون المتحرّكون على أنّ $T' = 0$. لذلك نحصل على $T = vL/c^2$، و$L'=\gamma(L-vT), =\gamma(L-[v^2/c^2]L)$، أي $\sqrt{1-v^2/c^2}$. إنّ تمدّد الأزمنة أسهل على الفهم، لأنّ المترونوم يومض بفواصل زمنية T وفاصل مكاني $L=0$. وبالتالي سيقيس المراقبون المتحرّكون $T'=\gamma(T-vL/c^2)=\gamma T$، حيث قيمة عامل غاما أكبر من الواحد دوماً.

نستطيع الآن أن نفهم سببَ عدم قدرتنا على اللحاق بالقطّ أوليي عندما يكون متحرّكاً بسرعة الضوء. يبدأ أوليي بالركض في الحادثة 1 في الزمكان ـ حيث إحداثياتُها (x,y,z,t) مساوية لـ (0,0,0,0) ـ بسرعة قدرها u في الاتجاه x+ . بعد مرور زمن قدره T يكون أوليي ماراً بمحاذاة نقطة أخرى في المكان معرّفاً بذلك الحادثة 2 في الزمكان بإحداثيات $(T,0,0,T)$. وهكذا تكون سرعة أوليي في جملة المقارنة الساكنة هي مجرّد حاصل قسمة الفرق بين قيمتَي الإحداثيَين المكانيَين $uT - 0 = uT$ على الفرق بين قيمتَي الإحداثيَين الزمنيَين $T - 0 = T$؛ أي $uT/T = u$.

لنفترض الآن أنني أعدو في الاتجاه x+ بسرعة v+ بالنسبة إلى جملة المقارنة الساكنة. ما هي قيمة سرعة أوليي التي أقيسها؟ انطلاقاً من تحويل لورنتز ـالمذكور في الهامش 9 أعلاه ـ الذي ينقلني إلى إحداثيّاتي المتحرّكة (x',y',z',t') تكون إحداثيات الحادثة 1 هي (0,0,0,0) وإحداثيات الحادثة 2 هي $(\gamma(uT-vT), 0, 0, \gamma(T-uvT/c^2))$؛ إذاً سأجد المسافة على محور الـ x الفاصلة بين الحادثتَين مساويةً لـ $\gamma(u-v)T$، بينما تكون الفترة الزمنية الفاصلة مساويةً لـ $\gamma(1-uv/c^2)T$، وبالتالي أحصل على السرعة بالطريقة الاعتيادية كنسبةٍ بين الفاصل المكاني والفاصل الزمني: $u' = \gamma(u-v)T / \gamma(1-uv/c^2)T$؛ وهكذا أحصل على $u' = (u-v) / (1-uv/c^2)$. إنّ u' إذاً هي السرعة التي ألاحظ أوليي متحرّكاً بها ومبتعداً عنّي عندما أطارده بسرعة v (مقيسة في المرجع الساكن).

تُدعى هذه الصيغة بـ**قانون جمع السرعات** في الحالة الخاصّة الموافقة للحركة المتوازية. لاحظ أنه إذا اعتبرنا سرعة الضوء لانهائية فإنّ القانون يعيدنا إلى الصيغة: $u' = (u-v)$، وهي تماماً ما تتنبّأ به الفيزياء الغاليليّة. إذا تحرّك أوليي بسرعة الضوء، فعندها يكون $u = c$ وسوف تصبح قيمة سرعة أوليي التي أقيسها: $(u' = (c-v)/(1-cv/c^2) = c)$! مهما كانت قيمة سرعتي v فإنني سوف أجد أوليي ـ أي الموجات الضوئية ـ تبتعد عنّي بالسرعة c نفسها. بطبيعة الحال=

المتحرّكون المسافةَ الفاصلةَ بين الأجسامِ وقد **تقلّصت** ـ أي قصرت ـ بمقدار $\sqrt{1-v^2/c^2}$. وهكذا إذا كانت السَرعةُ قريبةً من سرعة الضوء ـ لنقل مثلاً v = 0.866 c ـ بدت الأطوالُ والمسافاتُ أصغرَ بمقدار النصف منها في المرجع الساكن.

تبدو الأجسام المتحرّكة ـ حسب نسبية إينشتاين ـ متقلّصةً ومنكمشةً في اتجاه حركتها، لتغدوَ مهروسةً ومسحوقةً ـ واقعةً في شبهِ مستوٍ مثل حال الفطائر ـ عندما تقترب سرعتها من سرعة الضوء. على سبيل المثال، لنفترض أنّ الجسمَ المعني هو عبارة عن بروتونٍ شكلُه الاعتيادي في حالة السكون مثل قطرة كروية مؤلّفة من كواركات. بعد أن يتمّ تسريعُه في فيرميلاب لتصلَ سرعته إلى 99,99995 في المئة من سرعة الضوء، فإننا نلاحظ أنّ شكله أصبح مسحوقاً كفطيرةٍ في اتجاه حركته بمقدار 1/1000. في الحقيقة كلّما تحرّكت الأجسام بشكلٍ أسرع، غدت أقصر وأصغر في اتجاه حركتها إلى أن ينعدمَ طولها (الموازي لاتجاه الحركة) تماماً عند v → c! تغدو الأشياء إذاً ـ كما يراها المراقبون الساكنون ـ مهروسةً بشكل فطائر في اتجاه حركتها، ولكنْ لو ركبنا فوق أحدها في أثناء طيرانه فلن نرى أيّ أثرٍ على شكل الجسم. في الواقع ـ وبشكلٍ أشبه ما يكون بالمفارقة ـ فإننا سنرى الكون بمجمله ـ عندما ننظر من نافذة مركبتنا الفضائية النسبوية ـ متحرّكاً بسرعةٍ قريبةٍ من سرعة الضوء ولكن في الاتجاه المعاكس، وبالتالي فإنّ هذا الكونَ هو الذي سيبدو حينها مهروساً كفطيرة بالنسبة إلينا!

لنتخيّل أن لدينا ساعة تُصدر وميضاً ضوئياً تكرارياً كلّ T = 1

= هذا الأمرُ يعيد تأكيدَ نقطة البداية للنسبية الخاصة ـ لا غير ـ من حيث إنّ الأخيرة افترضت ثباتَ سرعة الضوء في بنيانها النظري منذ البداية.

ثانية. يمكن اعتبار الومضات الضوئية كما لو كانت «تِكّات» و«تَكّات» مثل حال بندول الإيقاع (المترونوم) الذي يستعمله طلّاب العزف على البيانو. ما هي قيمة قياس المراقبين المتحرّكين للفترة الزمنية الموافقة لتِك ـ تاك؟

ليس من الصعب استنتاجُ أنّ هؤلاء المراقبين سيلاحظون صدور هذه النبضات ضمن فترات منتظمة، ولكن بفاصل زمني مساوٍ لـِ $T' = T/\sqrt{1-v^2/c^2}$ (ضع L = 0 في صيغة تحويل لورنتز الموافقة للفارق الزمني). إذاً سيستدلّ بذلك المراقبون المتحرّكون على أنّ الفاصل الزمني ما بين أيّ ومضتَين متتاليتَين 'T أكبرُ من T = 1 ثانية. وهذا يعني أنّ الساعةَ ستبدو أنها تتكّ **بشكل أبطأ!** بطبيعة الحال فإنّ الساعةَ ـ من وجهة نظر المراقبين ـ هي التي تتحركّ بالنسبة إليهم بسرعة v في الاتجاه المعاكس. استناداً إلى ذلك نقول إنّ الساعات المتحرّكة بالنسبة إلى «راصدٍ ساكن» تبدو ذات إيقاع أبطأ من الإيقاع العادي (كأنّ الزمن الذي تقيسه يسير ببطء).

على سبيل المثال، إذا تحرّك المراقبون بسرعةٍ كبيرة تصل إلى v = 0.866 c فإنهم سيلحظون أن 'T = 2 ثانية، ويعني ذلك أنهم سيرون مؤشّرات الساعة تسير بـ**نصف** سرعتها الاعتيادية. تبدو جميعُ ساعاتِ منظومةٍ متحرّكةٍ بسرعةٍ من رتبة سرعة الضوء ـ بالنسبة إلينا ـ ذات إيقاع زمني بطيء، وتُدعى هذه الظاهرة باسم **تمدّد الأزمنة** (وقد ذكرنا هذه التسمية من قبل). عندما نراقب ساعاتِ منظومةٍ تقترب سرعتها من سرعة الضوء، فإننا نرى أنّ الفاصلَ الزمني الموافق للتكّة (تِك ـ تاك) قد أصبح لامتناهياً في الكبر، وبالتالي ستبدو الساعات متوقّفةً عن العمل.

في الحقيقة نلاحظ في التجارب المخبرية الفعلية أنّ الجسيمات الأولية التي تسير بسرعةٍ قريبةٍ من سرعة الضوء تعيش في الواقع فترةً أطولَ ممّا لو كانت ساكنة: فنرى أنّ عمرَ نصف حياتها قد طال

بشكلٍ متوافقٍ تماماً مع تنبؤّات النسبية، ولكن لو استطعنا ركوبَ إحدى هذه الجسيمات الأولية النسبوية، لما أحسسنا بأيّ تمددٍ للأزمنة في تلك الحالة، بل كنا سنرى الكونَ برمّته متحرّكاً في الجهة المعاكسة لتبدوَ جميعُ ساعاته بالنسبة إلينا وقد تباطأت!

نال أحدُ مؤلّفَي هذا الكتاب (ل. م. ليديرمان) شهادةَ الدكتوراه التي له على تحقّقِه من التنبّؤ بالتباطؤِ الظاهري للساعات المتحرّكة بسرعةٍ قريبةٍ من سرعة الضوء. أما «الساعة» فكانت حزمةً من الميونات ـ وهي جسيماتٌ تتفكّك وتتحللّ خلال 2,2 ميكروثانية (أي 2,2 جزء من مليون جزء للثانية) عندما تكون ساكنة. تمّ إصدار الميونات كنواتجَ ثانوية لحوادثَ صدمٍ تضمّنت البروتونات المسرَّعة في سينكرو سيكلوترون لجامعة كولومبيا (Columbia). وُجد أن عمر نصف الحياة لحزمة ميوناتٍ تطير بسرعة مساوية لـ 86 في المئة من سرعة الضوء يساوي تقريباً 4,2 ميكروثانية أي يبلغ حوالي ضعفَي قيمته في حالة السكون. يعود قياسُ هذا التغيّر في عمر نصف الحياة للميون وبدقة 5 في المئة إلى سنة 1950. تسير الميوناتُ التي يتم إنتاجُها اليوم في الفيرميلاب بسرعاتٍ أقرب بكثير من سرعة الضوء، وبالتالي لها أعمار نصف حياة أطول بآلاف المرّات من عمر نصف الحياة للميون الساكن. أرجوكم ألاّ تحسدوا الميونَ على طول حياتِه المتزايد، فبالنسبة إليه إنّ ساعاتِكم هي التي تبدو متباطئة، وبالتالي إنّ حياتَكم أنتم هي التي امتدّت أكثر!

تقود ظاهرة تمدّد الأزمنة إلى أحجية ذهنية طريفة وشهيرة تُدعى بِ**مفارقة التوأمَين**. لنتخيّل أنّ عروساً جديدة ـ بعد قضائها لشهر عسلٍ رومانسي وطويل ـ وضعت جانباً حياتَها الشخصية من أجل مصلحةَ العلم، فقامت بالتوقيع على عقدٍ للذهاب في مهمةٍ فضائية محفوفةٍ بالمخاطر. بعد عناقٍ طويل تودّع الزوجةُ زوجَها وتغادر الأرض

بكلماتٍ وداعية: «حبيبي، أنا ذاهبةٌ لمدة أسبوعَين لا أكثر». تسافر العروس إلى نجم بعيد بسرعةٍ تساوي تقريباً سرعةَ الضوء، وعلى الرغم من أن المسافة إلى هذا النجم البعيد تبلغ عشر سنين ضوئية عن الأرض كإنها قد قصرت وتقلّصت ـ من وجهة نظر جملة المقارنة المرتبطة بالعروس ـ إلى مجرّد أسبوعٍ ضوئي. تأخذ الزوجةُ بعضَ الصور عند وصولها للنجم، ثم تقلبُ جهةَ نفث محرّكاتها مباشرةً، لتنطلقَ حالاً في رحلة العودة إلى الأرض وبالسرعة الكبيرة نفسها. وبالفعل لا تكون العروسُ قد أمضت في الرحلة ـ بحسب ساعتِها ـ أكثرَ من أسبوعين، وبمجرّد وصولها للأرض تركض لعناقِ زوجها.

ولكنْ بالنسبة إلى الزوج ـ الذي بقيَ على الأرض متابعاً بإخلاص رحلةَ زوجته الفضائية البعيدة ـ استغرقت الرحلةُ الانكفائية (الذهاب والإياب) حوالي العشرين سنة، لذلك بدا عليه التقدّمُ في العمر إذ كبر بمقدار عشرين عاماً. والأكثر من ذلك أنه لاحظ خلال الرحلة وأثناء طيرانِ مركبةِ زوجته بسرعتها الكبيرة أنّ ساعاتِها بدت كما لو كانت قد **تجمّدت** فعلاً بفعل تمدّد الأزمنة، بحيث لم يتعدّ الزمنُ الذي استغرقته الرحلةُ ـ وفقاً للساعات الموجودة في المركبة ـ فترةَ الأسبوعَين. عندما التقى الزوجان بعد انتهاء الرحلة كان العريس قد كبر فعلاً بمقدار عشرين سنة، أما العروس فلم تكبر إلاّ بمقدار أسبوعَين. ومع ذلك ـ وكحال الخمر المعتّقة ـ لم يثبّط هذا الأمر من حماسهما للّقاء، وإن قلّل من كفاءة الأداء.

تنجم المفارقةُ في هذا المثال عندما نتناول تفاصيلَ الرحلة من وجهة نظر العروس. في الواقع كانت العروسُ ساكنةً في مرجعها تراقب زوجَها المتحرّكَ بعيداً عنها في الاتجاه المعاكس، ولذلك بدت ساعاتُه هو ـ بالنسبة إليها ـ متباطئةً. كيف يمكن إذاً للزوجة تفسيرُ واقعِ أنّ زوجَها قد كبر بهذا المقدار الكبير أمّا هي فلا؟ يكمن حلُّ المفارَقة في أنّ وصفَ الرحلة ـ من وجهة نظرها ـ لا يمكن أن

يتمّ من دون الأخذ بعين الاعتبار لآثار **التسارع.** لقد عانت الزوجة تسارعاً (هائلاً) في البداية لإيصالها إلى ما يقارب سرعة الضوء، بينما لم يواجه الزوجُ المخلص هذا الشعور. رأت العروسُ خلال هذه الفترة التسارعية المسافةَ الكبيرة التي تفصلها عن النجم وقد تقلّصت من عشر سنين ضوئية إلى مجرّد أسبوعٍ ضوئي بفعل تقلّص الأطوال، لأنّ النجم يكون خلالها قد صار يقترِب منها بسرعة مساويةٍ تقريباً لسرعة الضوء. إنّ «طورَ المعزِّز» هذا هو الذي ترى العروسُ أثناءَه زوجَها يشيخ من وجهة نظرها. إنّ الأمر كلّه يبدو كأنّما العريس كان ـ أثناء فترة تسارعها ـ يسقط في الفضاء سقوطاً حرّاً (أو عطالياً)، بينما كانت هي ـ في فترة التسارع تلك ـ كما لو أنّ حقلاً ثقالياً قوياً قد أمسك بها وهي في مكانها.

نستبقُ هنا حقيقةً أدركها إينشتاين لاحقاً، وهي أنّ الساعات العطالية التي تعمل ضمن حقولٍ ثقاليةٍ قويةٍ يجب أن يكون إيقاعها أبطأ من الساعات التي تسقط سقوطاً حراً. في الواقع يستبق هذا القولُ نتيجةً في النسبية العامة تُدعى بـ**الانزياح نحو الأحمر لإينشتاين.** نلاحظ أنّ الضوءَ الذي يصدر عن سطح نجم ضخم ـ حيث القوة الثقالية شديدةٌ جداً ـ قد **انزاح نحو الأحمر** فعلاً، كما لو أنّ الذرات على سطح ذلك النجم تمتلك ساعاتٍ تتكّ بشكلٍ أبطأ من ساعاتِ مراقبين بعيدين يسقطون سقوطاً حرّاً (تواترُ موجةِ الضوء الأحمر أصغرُ من تواتر موجة الضوء الأزرق). وهكذا تكون العروس خلال الطور (الأطوار) التسارعيّ (التسارعية) قد رأت عريسها يكبر بمقدار عشرين سنة، بينما هي ـ باعتبارها الشخص المتسارع (الموجود فعلياً في حقلٍ ثقاليّ شديد، وبالتالي المُنزاح نحو الأحمر إينشتاينياً) ـ لم تكبر البتّة. وبذلك يتمّ حلّ أحجية مفارقة التوأَمين، فهي في نهاية الأمر لم تكن مفارقةً على الإطلاق، والعروس ستسعد فعلاً بحقيقة أنها لم تكبر أكثر من أسبوعَين خلال الرحلة بكاملها.

يكمن السببُ الجوهري لهذه الآثار الغريبة في أنّ حادثتَين متواقتتَين بالنسبة إلى مراقبٍ ما قد لا تكونان هكذا ـ في الحالة العامة ـ بالنسبة إلى مراقبٍ آخر. هذه هي السمة المميِّزة للنسبية الخاصة التي تشكّل أساسَ هذه الآثار الغريبة.

الطاقة والاندفاع في النسبية الخاصة

تمثّلَ ردُّ فعل إينشتاين على أحجية سرعة الضوء بقبول صلاحيةِ ثباتِ سرعةِ الضوء بالنسبة إلى جميع المراقبين وبرَمْيِ مفهوم الزمن المطلق بعيداً. إضافةً إلى ذلك كان على **جميع** قوانين الفيزياء امتلاكُ هذا التناظر، إذ يجب أن تبقى لامتغيّرةً بالنسبة إلى المعزِّزات. لقد حلّت تحويلات لورنتز تماماً محلّ تحويلات غاليليو بين المراقبين المتحرّكين، ولذلك فإن مجملَ الفيزياءِ القديمة القائمة على أساس نسبية غاليليو ـ مثل قوانين نيوتن للحركة ولنظرية الثقالة ـ تحتاج إلى التغيير الآن.

بما أنّ أياً من معادلات نيوتن ليس صامداً (لامتغيّراً) بالنسبة إلى تحويلات لورنتز (عندما تقترب السرعةُ من سرعة الضوء)، فإنّ إينشتاين اعتبرها ـ وهو واثق من نفسه كلّ الثقة ـ جميعها خاطئةً، وذلك بالرغم من 250 سنة مليئة بالتطبيقات الناجحة لها! شرع إينشتاين بالتفكير في ما يجب فعلُه لإصلاح المفاهيم النيوتنية القديمة ـ مثل القوة والاندفاع والاندفاع الزاوي والطاقة ـ بمعادلات جديدةٍ صحيحةٍ ونسبوية. وضع إينشتاين نصب عينيه ـ وهو يقوم بذلك ـ فكرتَين اثنتَين: الأولى هي أنه مهما كانت التغييرات، فإنّ صلاحية قوانين نيوتن يجب استردادها عند السرعات البطيئة؛ أما الفكرة الثانية فهي أنّ القوانين الجديدة للفيزياء يجب أن تتمتّع هي نفسها بالتناظرات النسبوية. لا نعرف تماماً عند أيّ لحظةٍ أدرك إينشتاين ـ

خلال سلسلة أفكاره ـ أنّ ما يفعله سيغيّر جذرياً وللأبد مستقبلَ البشرية.

رأينا أنّ المبدأَ التناظري التعريفي في النسبية الخاصة هو أنّ الفاصلَ اللامتغيّر بين أيّ حادثتَين يجب أن يبدوَ نفسَه بالنسبة إلى جميع المراقبين: $\tau = T^2 - L^2/c^2$. يدخلُ المكان والزمان بشكلٍ متناظرٍ في هذه الصيغة ـ الشبيهة بعلاقة فيثاغورس عن طول الوتر في المثلث القائم ـ حيث إنّ كليهما مرفوعٌ للقوة الثانية.

ماذا عن الطاقة والاندفاع والكتلة؟ ترتبط هذه المقادير بعضها مع بعض في الفيزياء التقليدية لنيوتن، ولكن علينا الآن إيجاد علاقةٍ جديدة بين الطاقة والاندفاع تصلح في النسبية الخاصة. يقترح التناظرُ بين المكان والزمان تناظراً موافقاً بين الطاقة والاندفاع. في الحقيقة يمكننا أن نلتمسَ ونتوقع وجودَ هذا التناظرِ الموافقِ بين المفهومين الأخيرين استناداً إلى المقتضيات التي توجبها نظرية نوثر.

لنأخذ جسيماً بطاقةٍ E واندفاعٍ p وكتلة m. نعرفُ من نظرية نوثر أنّ الزمان مرتبطٌ بالطاقة $E \leftrightarrow T$ وأنّ المكان مرتبطٌ كذلك مع الاندفاع $p \leftrightarrow L$. يشيرُ هذا الأمر إلى أنه في النسبية الخاصة يجب أن تكون هناك «علاقة فيثاغورسية» موافقة تربط بين الطاقة والاندفاع. في الواقع يمكننا أن نقترحَ كون المقدار $E^2 - p^2c^2$ الموافق للفاصل اللامتغيّر $T^2 - L^2/c^2$ هو **أيضاً** لامتغيّرٌ بالنسبة إلى تحويلات لورنتز. يعني ذلك أنه إذا قاس مراقبٌ ما في «المرجع الساكن» الطاقةَ E والاندفاعَ p للجسيم، بينما وجدَ مراقبٌ آخر متحرّكٌ بالنسبة إلى الأول قيمتَين مختلفتَين 'E و'p للجسيم؛ فإنّ التناظر النسبوي ـ مع ذلك ـ يقتضي أنه لدينا $E^2 - p^2c^2 = E'^2 - p'^2c^2$[12]. (يجب أن

---

(12) تقتضي هذه النتيجة أنّ مراقباً أوّلَ سيرى الجسيمَ ممتلكاً لطاقة واندفاع هما =

نلاحظ أننا وضعنا هنا العاملَ الضربي لسرعة الضوء c في مكانه المناسب من أجل تحقيق الانسجام الداخلي بين الأبعاد والوحدات. حيث يجب تذكّر أنّ للطاقة بُعداً ـ أي وحدة ـ هو بعدُ الاندفاع مضروباً ببعدِ السرعة، أي pc).

الآن لابدّ أن تدخل الكتلة العطالية m للجسيم في مكانٍ ما من العلاقة الجديدة التي تربط بين طاقة الجسيم واندفاعه. إنّ السببَ في ذلك هو أنّ الكتلةَ العطالية لجسيم ما سمةٌ ذاتية مميّزة للجسم، وبالتالي يجب أن تكون بدورها مقداراً لا متغيّراً. وهكذا خمّن إينشتاين أنّ هذا التركيبَ الجديدَ اللامتغيّر والمتضمِّنَ للاندفاع والطاقة يجب أن يكون **مكافئاً للكتلة العطالية** m: $E^2 - p^2c^2 = m^2 c^2$. (مرة أخرى كان علينا إدخال العامل الضربي c4 في الطرف اليميني من الصيغة للحصول على أبعادٍ ووحداتٍ متّسقة. لم نكن سنتعرّض لهذه المشكلة لو استخدمنا نظامَ وحداتٍ ذكي حيث c = 1!). ولنحاول فهمَ معنى هذه النتيجة اللافتة للنظر. ماذا يحدث لو كان جسيمُنا ساكناً؟ يكون الاندفاع معدوماً في هذه الحالة p=0، وتعطي صيغتنا عندها $E^2 = m^2 c^4$، وبالتالي إذا ما أردنا معرفة الطاقة أخذنا الجذر التربيعي لكلا طرفي هذه الصيغة وعندما نفعل ذلك نجد: $E^2 = mc^2$.

= $(E, \vec{p})$، بينما يراه مراقبٌ ثانٍ متحرّكٌ بالنسبة إلى الأوّل بسرعة v في الاتجاه +x ممتلكاً لطاقةٍ واندفاعٍ مختلفَين $(E', (E, \vec{p}')$. في الحقيقة ترتبط هذه المقادير مرة أخرى عبر تحويلات لورنتز:

$$p'_x = \gamma\left(p_x - vE/c^2\right), p'_y = p_y, p'_z = p_z, E' = \gamma\left(E - vp_x\right)$$

سيجد المراقب المتحرّك ـ وبالرغم من أنّ قيمتي الطاقة والاندفاع قد تغيّرتا الآن ـ أنّ الكتلة العطالية تبقى نفسها

$$E'^2 - |\vec{p}'|^2 c^2 = m^2 c^4$$

قبل أن تصيح «وجدتها!»، علينا التحقّق من شيءٍ آخر. ماذا يحدث إذا كان الجسيم متحرّكاً باندفاع صغيرٍ جداً؟ وجد إينشتاين من علاقته الجديدة أنه إذا كان الاندفاع صغيراً ـ أي صغيراً مقارنةً مع mc ـ فإنّ الطاقة تصبح[13]:

$$E = mc^2 + \frac{p^2}{2m} + \ldots$$

يعبّر الحدُّ الثاني من الطرف اليميني تماماً عن الطاقة الحركية لجسيم نيوتني يتحرّك ببطء (مقارنةً مع سرعة الضوء)، أو بشكلٍ مكافئٍ ـ وحيث إنّ الاندفاعَ في هذه الحالة هو p = mv لا غير ـ تكون الطاقة الحركية هنا مساويةً لـ:

$$K.\,E. = \frac{1}{2} mv^2$$

وهو التعبير نفسه الذي رأيناه سابقاً عند حسابنا لطاقة السيارة المتحركة.

---

(13) يأتي ذلك من التقريب المستخدِم لنشر تايلور بالنسبة إلى الجذر التربيعي: $\sqrt{a^2 + x^2} \approx a + x^2/2a$ من أجل x a. يمكن أن نعيد الحسابات الآن بالاتجاه المعاكس لكي نحصل على الصيغ النهائية للطاقة والاندفاع من أجل جسيم متحرّك. بما أنّ الجسيم ساكنٌ في مرجعه الساكن، فإنّ طاقته واندفاعَه في هذا المرجع الساكن ($E = mc^2$, $\vec{p} = \vec{0}$) لنقُم الآن بإجراء معزّز ينقلنا إلى مرجع يتحرّك فيه الجسيم بسرعة $\vec{v} = (v, 0, 0)$ (لاحظ أنّ هذا المعزّز موافقٌ لسرعة $-\vec{v}$). سنجدُ أنّ عبارة الطاقة والاندفاع لجسيم متحرّك هي:

$$\text{Einstein:}\quad E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\text{Newton:}\quad E = \frac{1}{2} mv^2, \qquad \vec{p} = m\vec{v}$$

لقد كتبنا العبارات النيوتنية الموافقة بغرض المقارنة. هناك فارقٌ كبير وهائل بين الصيغتَين، ومرة أخرى نرى أنّ الطاقة السكونية $E = mc^2$ يقتضيها تعويضُ $\vec{v} = \vec{0}$ في صيغة إينشتاين أعلاه التي تعطي من أجل سرعات صغيرة التقريبَ التالي:

=

لابدّ أن ينتزعَ هذا الأمرُ منا أكبرَ صرخةِ «وجدتها» ممكنة منذ أن هتفَ أرخميدس أولاً بتعبير التعجّب هذا! تخبرنا هذه النتيجة بشيءٍ عميقٍ جداً هو **أنّ الجسيمَ يظلُّ يمتلك طاقةً وهو في حالة السكون**، وهذا ما تعبّر عنه المعادلة الشهيرة الطنّانة:

$$E = mc^2$$

إنّ مقتضيات هذه الصيغة مهمة وكبيرة جداً، فالكتلة العطالية تكافئ مقداراً معيّناً من الطاقة. وإنّ هذه المعادلة مشهورة لدرجة أنها كثيراً ما تظهر على ظهور قمصان الـ تي - شيرت (T-shirt)، أو على لوحات الرخص والتسجيل المعدنية، أو في أفلام الكرتون، أو في أفلامِ هوليوود، أو على جدران عربات المترو ودورات المياه، أو في

$$= \quad E \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2, \quad \vec{p} \approx m\vec{v}$$

نرى إذاً أنه في النسبية الخاصة لا يمكننا أبداً إيصال سرعة جسيم ذي ثقلٍ (أي بكتلة عطالية m غير معدومة) إلى سرعة الضوء. فعندما $|\vec{v}| \to c$ تصبح قيمتا الطاقة والاندفاع لانهائيّتَين، وبذلك سوف نحتاج إلى طاقةٍ لانهائية من أجل تسريع البروتون إلى سرعة الضوء. نقوم في تيفاترون الفيرميلاب بتسريع البروتونات إلى طاقةٍ بمقدار تريليون إلكترون فولط، وبما أنّ طاقة الكتلة السكونية للبروتون هي حوالي مليار إلكترون فولط، فإننا نستنتج أنّ التيفاترون يعزِّز (يدعم) البروتون ليجعل عامِل لورنتز $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ الموافق بقيمة حوالي 1000. يعني هذا أنّ $v/c \approx 0.9999995$، أي أنّ التيفاترون يسرّع البروتون إلى 99,99995 في المئة من سرعة الضوء. لن تستطيع البروتونات الوصولَ تماماً إلى سرعة الضوء حتى مع أقوى مسرّعات الطاقة العالية في العالَم! كيف يمكن إذاً لأيّ شيءٍ أن يتحرّك بسرعة الضوء؟ نرى أننا إذا أخذنا $|\vec{v}| = c$ وسمحنا للجسيم أن يكون معدومَ الكتلة، فإنّ قيمة الطاقة تصبح غير معيَّنة، إذ إننا سنحصل على E=0/0. مع ذلك يسمح هذا الأمر لجسيم معدوم الكتلة - أي شيءٍ ما لا كتلةَ عطالية له - أن يمتلك قيماً منتهية ومحدودة للطاقة والاندفاع. إذا نظرنا إلى العلاقة بين الطاقة والاندفاع، وجدنا أنّ الجسيم معدومَ الكتلة يجب أن يحقّق $E = |\vec{p}| = c$. في الحقيقة تصف هذه الصيغة جسيماتِ الضوء - أي الفوتونات - فالفوتونات لا كتلة عطالية لها بالمرّة، ورغم هذا فهي تنقل وتحمل الطاقة والاندفاع عبر المكان. تتحرّك الفوتونات دائماً وأبداً بسرعة الضوء، ولا يمكنها أن تتوقّف وتصبح ساكنة ولا أن تتحرّك بسرعة منتهية أقلّ من c، لأنّ طاقتها حينئذ ستكون مساوية للصفر.

المسرحيات الموسيقية لمسرح برودواي (Braodway)، أو في الرسوم الموضوعة على الورق المنشِّف للحبر في المكتب البيضوي (Oval Office) في البيت الأبيض، وفي مجالاتٍ أخرى عديدة. بالرغم من أنّ الطاقةَ والكتلة شيئان مختلفان، فإنّ هذه العلاقة البسيطة تُخبرنا أنّ أيّاً منهما يمكن أن يتحّول إلى الآخر من حيث المبدأ. وهكذا فإنها تحرّر وتطلق العنانَ لكامل الطاقة في الكون سواءٌ أكان ذلك في الضراء أم في السراء.

لنفترض أننا استطعنا تحويل كيلوغرام واحد (حوالي 2,2 رطل) من الكتلة إلى طاقة. تخبرنا معادلة إينشتاين أننا سنحصل حينئذٍ على $((1kg) \times c^2 = (1 Kg) \times (3 \times 10^8 m/s) = 9 \times 10^{16})$ جـول. هـذا مقدارٌ كبير من الطاقة قادرٌ على جعل سفينة فضائية بكتلة 10000 كلغ (أي حوالي 10 أطنان) تطير بسرعةٍ أكبر من 1 في المئة من سرعة الضوء. والأكثر من ذلك أنّ تكافؤ الكتلة ـ الطاقة لإينشتاين يخبرنا بأنّ كتلة نواة اليورانيوم ـ 235 أكبر في الحقيقة من كتلة النوى البنات والنترونات الحرّة التي تصدر في حالة تحلّل (انحلال) النواة الأم. لا يمكننا أبداً أن نحقّقَ مصونيةَ الطاقة الإجمالية في مثل هذه الإجرائية إذا لم نأخذ بعين الاعتبار تحوّلَ طاقةٍ سكونية إلى طاقةِ إشعاعٍ صادرة. إنّ أيَّ إجرائية يتمّ فيها تحويل المادة إلى طاقة ـ أي لا تكونَ فيها الكتلة الكلية مصونة ـ لا يمكن وصفها إلاّ عبر النسبية الخاصة لإينشتاين[14]. تُعتبَر هذه المعادلةُ في غالبية الأحيان أحسنَ ما يعبّر

(14) بما أنّ الجسيم في حالة السكون يمتلك طاقةً مكافئة لكتلته العطالية، فيمكننا قياس كتلة الجسيم بدلالة هذه الطاقة. من المناسب في هذه الحالة استخدام وحدة طاقة مختلفة عن الجول، وبشكل خاص نستخدم كمّيةً ضئيلةً للغاية من الطاقة هي **الإلكترون فولط** (ونرمز لها اختصاراً بـ (eV)، وهي تساوي الطاقة التي تستهلكها بطارية 1 فولط عندما تدفع إلكتروناً واحداً وتمرّره خلال دارة كهربائية. يبيّن التحويل التالي مدى ضآلة هذه الوحدة: =

عن هوية عصر الفيزياء النووية، ولكنها صيغةٌ تتضمّن في ثناياها جميعَ الأشياء المنتشرة في أرجاء الكون والموجودة على مرّ العصور.

النسبية العامة

تستلزمُ النسبيةُ الخاصة أيضاً نظريةً جديدة عن الثقالة تحلّ محلّ نظرية نيوتن عنها. لا يمكن لنظرية نيوتن في الثقالة أن تكون صحيحة، لأنه لا يمكن لأيّ إشارة أن تنتقل بأسرع من الضوء، بينما تقول نظرية نيوتن بانتشار قوة الثقالة آنياً بين جسمين متفاعلين ثقالياً. يمكن لنظرية نيوتن أن تقدّم وصفاً جيّداً للجسيمات أو المنظومات

= (1 Joule = 6,24150974 x 10^{18} eV) هذه الوحدة مع ذلك مفيدة جداً، إذ إنّ كتلة البروتون المساوية لـ $1,67262158 \times 10^{-27}$ كيلوغرام يمكن إعادة كتابتها بدلالة الإلكترون فولط كما كما يلي: $m_{proton}c^2 = 1.5 \times 10^{-10}$ joules = 938MeV يعني واحد مليون إلكترون (1 MeV فولط، أو 10^6 eV). غالباً ما نقوم بتقديرٍ تقريبي يتمثّل في اعتبار كتلتي البروتون والنترون متساويتَين ومساويتَين تقريباً لـ 1 GeV (أيّ مليار إلكترون فولط e^v أو 10^9).

إذا قمنا بإحراق الكربون ـ عبر اتّحاد ذرّة كربون C مع جزيء أوكسيجين O_2، فإننا ننتج جزيءَ ثاني أكسيد الكربون CO_2 مع إطلاق طاقة مساوية تقريباً لـ E = 10 eV (على شكل فوتونات). لذلك تكون كتلة الجزيء CO_2 أقلّ في الحقيقة من كتلة C وO_2 الابتدائية بمقدارٍ صغير E/c^2. يمثّل هذا نقصاً في الكتلة الابتدائية لذرة الكربون وجزيء الأوكسيجين (التي تحوي تقريباً 16 + 16 + 12 بروتوناً ونترونا، أو ما يكافئ 46 GeV من الكتلة)، ويكون المقدار النسبي لهذا النقص هو حوالي: $10eV / 46\ GeV \approx 0.2x10^{-9}$. إن الناتج الأخير يعبّر عن فعالية التحويل، وبالتالي نحتاج من أجل تلبية احتياجات الولايات المتحدة من الطاقة إلى إحراق ($1000\ kg/ (0.2 \times 10^{-9}) \approx 5 \times 10^{12}$) كيلوغرام من النفط في السنة [باستخدام $E = mc^2$ و(c=3×10^8 م\ثا)، نجد أنّ 1000 كيلوغرام تكافئ طاقة بمقدار 10^{20} جول، وهو الاستهلاك السنوي للطاقة في الولايات المتحدة [انظر الهامش 12 في فصل الثاني من هذا الكتاب]. في عملية الانشطار النووي تتحوّل نواة اليورانيوم ـ 235 بشكلٍ نموذجيّ إلى نوى أخفّ، بحيث تعطي حوالي 200 MeV في كلّ عملية انشطار. يمثّل هذا فعاليةَ تحويل بمقدار: $200\ MeV / (235 \times 1\ GeV) \approx 10^{-3}$، فالانشطار أكبرُ فعاليةً بكثير من حرق الكربون. في عملية الاندماج النووي تتحد نواة الهيدروجين (بروتون) مع نواة الدوتيريوم (بروتون + نترون) لإنتاج نظير الهليوم 3 (2 بروتون + 1 نترون) مع إطلاق 14 MeV من الطاقة، مما يمثّل فعاليةَ تحويلٍ بمقدار 4×10^{-3}.

المتحرّكة ببطء - أي الجسيمات **غير النسبوية** - والمتضمّنة جسيماتٍ وإجرائيات لا تختبر تحوّلاً لطاقةٍ سكونية إلى طاقةٍ حركية. إنّ النظريةَ الشاملة للثقالة هي نظريةُ النسبيةِ العامة لإينشتاين التي تُعتبر تحفةً رائعةً من منجَزات العقل البشري. وكما لمّحنا سابقاً تتضمّن هذه النظرية مبدأَ العطالة، ولكن بصورة أكثر أساسيةً وعمقاً[15].

لنقفز الآن بأفكارنا لنسأل سؤالاً بسيطاً يستبق أحدَ أهمّ النتائج وأكثرها دراميةً لنظرية النسبية العامة لإينشتاين: «ماذا يحصل إذا حاول جسيمٌ ما الإفلاتَ من على سطحِ جسم ذي جرٍّ ثقالي قوي لدرجة أنّ الجسيمَ يحتاج إلى تحويل **كلِّ طاقته الساكنة** إلى طاقةٍ حركةٍ من أجل النجاة؟» في الواقع سيكون الجسمُ الثقيل عندها قد منع هروبَ الجسيمِ البائس، لأنه لن يتبقّى شيءٌ من الجسيم المتحرّر متى ما نجح في فراره.

تُثبت الحساباتُ في النهاية أنّ الإفلاتَ من جسم ثقيل يغدو مستحيلاً، إذا كانت كتلةُ الجسم M الإجمالية مضغوطةً ومحصورةً ضمن كرةٍ نصف قطرها $R = 2G_N M/c^2$ حيث G_N ثابت الثقالة لنيوتن[16]. يُقال عندها إنّ الجسم أصبح **ثقباً أسود**، ويُدعى R

---

(15) هناك كثيرٌ من الكتب الجيّدة للشروع في مقاربة النسبية العامة مثل كتاب:
Robert M. Wald, *Space, Time, and Gravity: The Theory of the Big Bang and Black Holes*, 2nd Ed. (Chicago: University of Chicago Press, 1992); Clifford M. Will, *Was Einstein Right?: Putting General Relativity to the Test* (New York, NY: Basic Books, 1993),

أمّا من أجل الطالب الأكثر تقدّماً فالكتاب الأفضل: Steven Weinberg, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity* (New York: Wiley, [1972]).

(16) بطريقة تقنية: إنّ الوضع الذي يقتضي صرف مجمل طاقة الجسيم ذي الكتلة m من أجل أن يفلتَ من قوّة جرّ الجسم الكبير - مثل النجم - ذي الكتلة M ونصف القطر R، =

بـنصف **قطر شفارتزشيلد** للثقب الأسود. إذاً أيُّ جسم كتلتُه M محصورةٌ ضمن منطقةٍ نصفُ قطرِها أصغرُ من R ـ كما يُعطى بالعلاقة المذكورة أعلاه ـ سيكون ثقباً أسود، ولن يتمكن أيُّ جسيم ـ حتى ولو كان الضوء ـ من أن يفلتَ من هذا الثقب الأسود إذا ما اقترب منه لمسافةٍ أصغر من نصف قطر شفارتزشيلد الموافق له. على سبيل المثال، لو كان هذا الجسمُ هو كوكبُ الأرض، وقمنا بتعويض المقادير في العلاقة المذكورة أعلاه بقيمها، لوجدنا أنّ على كوكب الأرض ـ من أجل امتلاك خصائص الثقب الأسود ـ أن يصغرَ في الحجم ويصبحَ متراصّاً ومتمركزاً ضمن منطقة صغيرة نصف قطرها: $(R = 2G_N M_{Earth}/c^2 = 8.9 \times 10^{-3})$ متر، أي ربع إنش. يعني ذلك أنه إذا ضغطنا مجملَ الأرض إلى هذا الحجم الصغير، لغدت الأرض عندئذٍ ثقباً أسود. أما بالنسبة إلى الشمس فيبلغ نصفُ قطر شفارتزشيلد الموافق لها حوالي الميلَين، وستتجاوز عندها كثافةُ المادة التي تملأ مثلَ هذا الحجم بكثير كثافةَ النواة الذرية. هناك اعتقادٌ واسع الانتشار اليوم فحواه أنّ مراكزَ أغلب المجرّات تحتوي على ثقوبٍ سوداء ضخمة بكتلٍ أكبر بملايين المرّات من كتلة الشمس.

تفسّر النسبيةُ العامة الثقالةَ على أنها تقوّسٌ وانحناءٌ ـ أو التواءٌ وانعطافٌ أو انثناءٌ واعوجاجٌ ـ في هندسة بنية الزمكان بسبب وجود المادة. يولّد السقوطُ الحرّ في مركبةٍ فضائية تدور حول كوكب

= يعني أنّ شرط الإفلات هو أن تكون الطاقة السكونية للجسيم mc^2 أكبر أو تساوي الطاقة الكامنة الثقالية التي أوقعتها في الشرك، ممّا يعطي حسب نظرية نيوتن: $mc^2 = G_n Mm/R$. يتنبّأ هذا التقديرُ بقيمةِ نصفِ قطر شفارتزشيلد: $R = [2]\, G_n M/c^2$ من دون العامِل [2]. لقد كتبنا هذا العامِل في الصيغة، إذ إننا نجده عند إجراء الحسابات بطريقة صحيحة وفق النسبية العامة.

الأرض الذي يلوي ويثني المكانَ بثقالته شعوراً بانعدام الوزن، وبالتالي تكافئ هذه الحركةُ ـ من وجهة نظر المراقِب ـ حركةً حرّةً في فضاءٍ خالٍ لا وجودَ لأجسامٍ كبيرةٍ فيه تولّد تقوّساً وانحناءً للمكان. تتحرّك الأجسامُ الساقطةُ سقَوطاً حرّاً وفق «متقاصرات» (Geodesics) في الزمكان المنحني، وهذا يكافئ جوهرياً حركةً موضعيةً وفق خطوط مستقيمة إذا اقتصرنا على مسافاتٍ صغيرة، ولكنّ المتقاصِرَ يصبح مساراً منحنياً إذا ما نظرنا إليه على مقاييس كبيرة. تنجم بهذه الطريقة المداراتُ القطع ـ ناقصية المغلَقة للكواكب مع بعض التصحيحات الصغيرة التي تمّ التنبّؤُ الصحيح بها والتحقّقُ بالقياس منها. إنّ الكواكبَ في مداراتها هي في حالة سقوطٍ حرّ ضمن الزمكان الملتوي!

ليست نظريةُ نيوتن عن الثقالة في آخر الأمر إلاّ شكلاً تقريبياً لنظرية إينشتاين، نجده عندما تكون سرعات الحركات ذات قيّم صغيرة مقارنةً مع سرعة الضوء. تقدّم النسبيةُ العامة تفسيراً صحيحاً للشذوذات في حركة الكواكب التي لم تستطِع النظريات السابقة لها أن تعلّلها، مثل الحركة التبادرية لكوكب عطارد حيث يتقدّم موضع الحضيض الشمسي (أي الموضع الموافق لأقصر مسافةٍ عن الشمس) بحوالي درجة واحدة كلّ قرنٍ من الزمان، وهي ظاهرةٌ تعجز نظرية نيوتن عن تفسيرها. تتنبّأ النسبية العامة كذلك بشكلٍ صحيح بانعطاف ضوء النجوم ـ وخضوعه لـ «الأثر العَدَسيّ» مع انزياح ألوانه ـ عندما يمرّ بالقرب من أجسام ذات حقول ثقالية كبيرة أو عندما يغادرها. يمكن تطبيق نظرية إينشتاين في النسبية العامة على مجمل الكون، وهي تتنبّأ هنا بشكلٍ صحيح أيضاً بوجوب تمدّد الكون واتّساعه، وبأنّ الفضاء حرفياً يتم خلقهَ. إضافةً إلى ذلك ـ وكما رأينا سابقاً ـ تتنبّأ النسبية العامة بإمكانية أن تصبحَ الأجسامُ ثقيلةً جداً لدرجة

احتجازِها للضوء ولجميعِ أنواع المادة بحيث تمنعها من الإفلات والفرار من سطوحها، وتغدَوَ بالتالي ثقوباً سوداء تمثّلُ إجابةَ الطبيعة عن السؤال الملحمي: ماذا يشبه تارتاروس(*) أو الجحيم؟

(*) العالَم السفلي حيث يعيش هايديس (Hades) إله الجحيم عند اليونان.



الفصل الثامن

الانعكاسات

إذا اعتنَيتِ فقط بِكيتي (Kitty) ولم تتكلّمي كثيراً، فسأخبركِ بجميع أفكاري عن بيت المرآة. أولاً هناك الحجرة التي ترينها من خلال المرآة، وهي تشبه غرفة الرسم عندنا مع الانتباه إلى أنّ الأشياء تسير بعكس اتجاهاتها. أستطيع رؤيةَ كلّ الأشياء إذا ما وقفتُ فوق المقعد: كلَّ شيءٍ ما خلا القسمَ الصغيرَ خلف المدفأة. يا إلهي! كم أتوق لرؤية هذا القسم!

أليس ـ من خلال المرآة

عندما صعدت أليس (Alice) فوق غطاء المدفأة في حجرتها ذات الطراز الفكتوري لترى بشكلٍ أحسن ما إذا كانت هناك نارٌ في موقِد «منزل المرآة»، فقدت توازنها ووقعت في عالمٍ جديدٍ غريبٍ عجيب. توقّفت صلاحية قوانين الفيزياء الطبيعية في هذا العالَم، فقطع الشطرنج كانت تتمتم وهي تجول بين الحقول، أمّا هامبتي ـ دامبتي فقد سقط سقطةً كبيرة، وكانت هناك قصيدةٌ في الكتاب تقول كلماتها: جميع الميمسي كانوا البوروغوف، والرّاث من الموم آوتغريب (All Mimsy were the Borogoves, And the Mome Raths Outgrabe)(*).

(*) «عبر المرآة، وما وجدته أليس هناك (Through the Looking-Glass, and What =

ومع ذلك يمكننا أن نتساءلَ ـ على مستوى افتراضي ـ عن نوع العوالِم الفيزيائية الذي نراه فعلاً في المرآة!! في الواقع إننا نرى عالَماً مختلفاً عن عالَمنا، فالأحرف الأبجدية تكون معكوسةً، وأشعة الشمس تدخل غرفةً قريبة الشبه من غرفتنا لكنها لا تطابقها تماماً، أمّا صورتُنا فيها فنحن معتادون عليها ـ وليس الآخرون ـ حيث تبدو أيّ شامة وكذلك موضع مفترق الشعر على الجانب غير الصحيح من الوجه؛ ولكنها عدا ذلك تشبهنا إلى حدّ بعيد. يمكن إرجاع كلّ هذه الأمور إلى شيءٍ واحد: «تسير الأشياءُ بعكس اتجاهاتها» كما قالت أليس، فاليمين يغدو يساراً والعكس بالعكس.

إذا وضعنا جانباً قلبَ الاتجاهات هذا، فإنّ عالَمَ عكسِ اليمين باليسار ـ أي ما نراه خلال المرآة ـ لا يبدو مختلفاً البتّة عمّا اعتدّنا عليه. لو افترضنا أنفسنا الآن مراقِبين ماهرِين ودقيقين في ملاحظتنا لجميع الأمور التي تحدث في ذلك العالَم، وأننا منهجيون مثل كبلر عندما كان يحاول فهمَ قوانين الحركة وقواعدها، فماذا كنّا سنستنتج بخصوص قوانين الطبيعة في هذا العالَم المرآوي؟ هل كنّا سنجد اختلافاتٍ بين تلك القوانين في العالَم المرآوي وبين القوانين السائدة في عالَمنا؟ أم أنّ هذا العالَم «الثّنوي» الذي نراه من خلال المرآة مكافئٌ لعالَمنا في ما يخصّ القوانين الفيزيائية الأساسية؟ وبعباراتٍ

= *Alice Found There*)، قصة للأطفال كتبها لويس كارول (Lewis Carrol) عام 1871، كتتمة لعمله الأول: **أليس في بلاد العجائب**. تدور أحداث القصة حول أليس وتساؤلاتها ثم استكشافها لما يوجد في الطرف الآخر من المرآة، وعن لقائِها بهمبتي ـ دمبتي (Humpty-Dumpty) الذي يفسّر معاني بعض كلمات القصيدة الغريبة المؤلّفة من تركيباتٍ لا معنى معروفاً لها، فاليمسي (Mimsy) تركيبٌ من Miserable وFlimsy ويعني البائس، أما البوروغوف (Borogoves) فتركيبٌ من Bird وMop ويعبّر عن نوعٍ من الطيور ذات الريش، بينما الموم (Mome) ربّما تعني - From Home أي من البيت، والرّاث (Raths) هي نوعٌ من الخنازير الخضر، وفعل الآوتغرايب (Outgribe) يعني مزيجاً من الخوار والصفير.

أخرى هل سنجد أنّ ولوجَنا إلى «بيت المرآة» يمثّل تناظراً بحيث تبقى جميع القوانين الفيزيائية نفسها رغم قلب اليمين واليسار، وبالتالي يكون هذا الأمر الذي يبدو بالغ السطحية هو وحده ما يتمّ قلبه؟

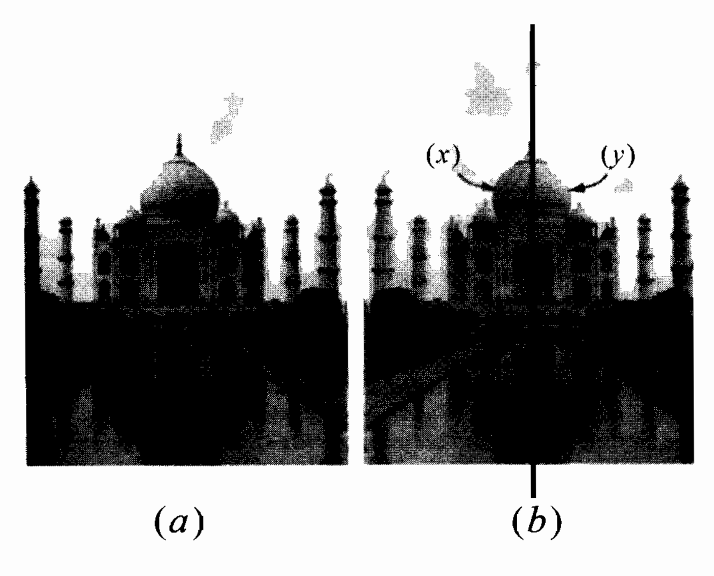
كما رأينا سابقاً ليست جميع التناظرات متّصلة. ورغم أنه لا يمكن تطبيق نظرية نوثر بشكلٍ تامّ إلاّ في حالة التناظرات المستمرة، فإنّه من الممكن حتى للتناظرات المتقطّعة أن تقتضيَ أنواعاً معيّنة من قوانين المصونية (وخاصةً في عالَم نظرية الكمّ). في الحقيقة تؤدي التناظرات المتقطّعة دوراً أساسياً وغامضاً في الطبيعة مثلها في ذلك مثل التناظرات المتّصلة، وعالَمنا مليءٌ فعلاً بتناظراتٍ متقطّعة، فهل يمكن لقلب اليمين باليسار والعكس بالعكس أن يكون أحد تناظرات الطبيعة هذه؟

تناظر الانعكاس

لننظر إلى منظومة فيزيائية معيّنة مثل بناء تاج محل (Tag Mahal) المبيَّن في الشكل 14a. نرى هنا المنظر المألوف لواجهة بناء تاج محل الأمامية مع حوض المياه العاكس والملوكيّ أمامها. يمكننا أن نستخدم هذه الصورة من أجل تبيان مفهوم عمليةِ ـ أو تحويلِ ـ تناظرِ متقطّعٍ يُعرف باسم **تحويل الانعكاس**.

رسمنا في الصورة الأخرى ـ الشكل 14b ـ خطاً مستقيماً من الأعلى إلى الأسفل ماراً من مركز واجهة تاج محل؛ إنه «محور التناظر» لصورة تاج محل. لقد «عكسنا» الصورةَ الأولى حول هذا الخطّ باستخدام برنامج حاسوبي للرسوم، ويعني ذلك أننا أخذنا أيّ نقطةٍ ـ مثل x على يسار الخطّ ـ وبادلناها بالنقطة y على يمينه حيث x وy تبعدان المسافةَ نفسها عن محور التناظر. إنّ الانعكاسَ بالنسبة

إلى صورةٍ فوتوغرافية هو تحويلٌ ثنائي البعد، ولكننا يمكن أن نتخيّل عمليةَ الانعكاس مطبَّقةً على مجمل الكائن ثلاثي الأبعاد. يصبح محور التناظر في هذه الحالة مستوياً يحوي الشاقول. نبادل عندها كلّ نقطةٍ x على يسار المستوي بنقطةٍ مكافئة y على يمين المستوي، بحيث تكون القطعة المستقيمة الواصلة بين النقطتين x,y عمودية على المستوي وتتقاطع معه في منتصفها تماماً.



الشكل 14: واجهة تاج محل: قبل (a)، وبعد (b) إجراء الانعكاس حول محور التناظر (تصوير CTH).

تعبّر عمليةُ الانعكاس عمّا نراه في المرآة، ويمكننا الحصول على صورةِ تحويلِ الانعكاسِ لكائنٍ ما عبر تصوير هذا الكائن كما يُرى في المرآة. على سبيل المثال، إذا أدرنا ظهرَنا إلى تاج محل، وواجهنا مرآةً تعكس صورة الواجهة في الشكل 14a، ثم صوّرنا ما نراه في المرآة، فإننا سنحصل تماماً على صورة واجهة تاج محل المنعكسة كما تبدو في الشكل 14b.

يبدو تاج محلّ فيزيائياً بعد إجراء هذا التحويل مثلما كان قبله، لذا يقول الرياضياتي إنّ واجهةَ تاج محل **متناظرةٌ بالنسبة إلى تحويلات الانعكاس**؛ أو إنها **تمتلكُ لاتغيُّراً (صموداً) انعكاسياً**. تسبّب عمليةُ الانعكاس قلبَ اليمين باليسار والعكس بالعكس، ويتمّ وفق التحويل **موافقةُ** (أي **مقابلةُ**) أيِّ نقطةٍ على يسارِ محور تناظر تاج محل **مع** نقطةٍ أخرى مكافئة تقع على يمين محور التناظر والعكس بالعكس.

لقد استخدم المعماريون التناظرَ الانعكاسي من أجل استحضار شعورٍ بالكمال والقدسية والجمال في تصميم تاج محل. يقلّد الفنُّ الطبيعةَ من خلال إدخاله لتناظرات متقطّعة، ويمكن رؤية تناظر الانعكاس في الحقيقة في مختلف نواحي الطبيعة. في علم التشريح وضمن تقريبٍ جيّد، يكون الجسم البشري وحتى الدماغ البشري نفسه كلاهما **متناظرَين بشكلٍ ثنائي الجانب**. لذلك عندما تنظر إلى نفسك في المرآة، فإنك ستبدو بالشكل نفسه تقريباً لِما تظهر عليه بالنسبة إلى شخصٍ ينظر إليك. يعني هذا أنّ إجراءَ عملية الانعكاس حول المستوي الشاقولي للوجه ـ أو المستوى الشاقولي لكامل الجسم البشري في الواقع ـ سيعطيك تقريباً وجهاً ـ أو جسماً ـ مكافئاً. إذا ما أخرجنا دماغاً بشرياً من الجمجمة فسنرى أنه متناظرٌ فيزيائياً بالنسبة إلى الشقّ المركزي الذي يعرّف جانبَيه اليميني واليساري. وبشكلٍ نموذجي يكون الجانبان اليميني واليساري من الدماغ مختلفين من ناحية الوظيفة والعمل، ولكنهما متشابهان من ناحية الشكل والبنية (يقول علماء التشريح إنهما متماثلان مورفولوجياً). وفي حقيقة الأمر يمتلك كثيرٌ من الكائنات الحية تناظراتٍ انعكاسيةً من أنواعٍ مختلفة.

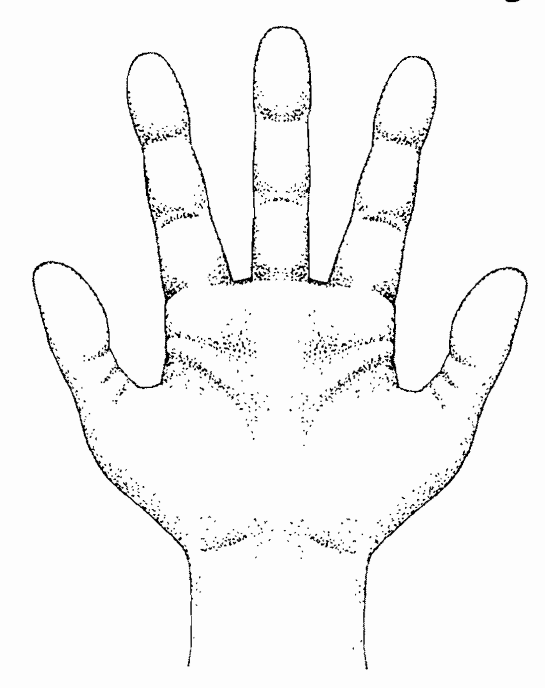
بالرغم من وجود كثيرٍ من الأشياء اللامتغيّرة عند إجراء الانعكاسات ـ أي أشياء تتمُّ مقابلتُها وفق هذه الانعكاسات بنفسها ـ فهناك أيضاً أشياء عديدة ليست صامدةً (لامتغيّرةً) عند عكسها بالمرآة.

على سبيل المثال، تصبح اليدُ اليسرى عند إجراء الانعكاس يداً يمنى، ونعرف أنّ اليد اليمنى واليد اليسرى مختلفتان بعضهما عن بعض. يعود سببُ هذا الاختلاف إلى إحساسنا الغريزي بوجود **اتجاهٍ نستطيع تدوير الأصابع وفقه بالنسبة إلى وضعية الإبهام**. يعرّف اتجاهُ الدوران النسبي هذا للأصابع مع موضع الإبهام مفهومَ اليدويّة اليمنى أو اليسرى (أي كوننا أيامِنَ أم عُسراً بالنسبة إلى استعمال الأيدي).

لنتخيّل كائناً حيّاً غريباً بيدٍ لها إبهامان ـ أحدهما طبيعي والآخر في مكان الخنصر ـ بحيث تكون اليد متناظرةً بالنسبة إلى الإصبع الوسطى، كما في الشكل 15. لا يوجد عند مثل هذه الكائنات الحية اختلافٌ بين اليدَين اليمنى واليسرى، وهكذا نستطيع تصوّر المشاكل في أنظمة السير والمرور في كوكب تقطنه مثل هذه المخلوقات الغريبة: فمَنْ يمتلك أفضلية المرور لليمين؟ وكيف يمكننا تمييزها عن أفضلية المرور لليسار؟ ستكون هناك أيضاً أخطارٌ وتحدّيات بخصوص السفر عبر إيقاف السيارات (الأوتوستوب).

بمقابل ما ذكرناه، هناك فارقٌ بين اليد اليمنى واليد اليسرى عند الكائنات البشرية. وإذا أخذنا علبةً من القفّازات ذات الراحات المبطَّنة (والتي تفرّق بذلك بين الوجه الداخلي للقفّاز والوجه الظاهري)، فإننا نستطيع دوماً التوصلّ بسهولة لمعرفة أيّ من القفّازات هي لليد اليمنى وأيّ منها لليد اليسرى. أما بالنسبة إلى الكائنات الغريبة فلن يكون هناك فارقٌ بين قفّاز يميني وآخر يساري. نرى إذاً هنا سمةً رياضياتيةً لمفهوم الانعكاس ونتائجه على العالَم الفيزيائي، فاليمين واليسار إمّا أن يمثّلا الشيءَ نفسَه أو أن يكوّنا زوجاً عضواه أحدهما الصورة المرآوية للآخر. بالنسبة إلى الكائن الغريب، إنّ الصورة المرآوية لليد مطابقةٌ لليد نفسها، فنقول إنّ يد الكائن الغريب تشكّل **أحادية** بالنسبة إلى الانعكاسات التي ـ من الناحية الأخرى ـ تشكّل يدَا الكائن

البشري **ثنائيةً** بالنسبة إليها. في حالة الأيدي البشرية، يمكن وجود شريكَين على الأكثر عند إجراء الانعكاسات، فلا وجودَ لشريكٍ ثالث في عملية الانعكاس، لأننا لو أجرينا عمليةَ انعكاسٍ بعد عملية الانعكاس الأخيرة المُجراة على اليد اليمنى، لحصلنا من جديدٍ على اليد اليمنى ذاتها (ونقول رياضياتياً: إنّ «مربّعَ الانعكاس» ـ أي الانعكاس الذي يلي انعكاساً سابقاً له ـ هو التطبيق المطابق). إذا عكسنا اليسارَ حصلنا على اليمين والعكس بالعكس. نصف الشيءَ الذي لا يكون صامداً (لامتغيّراً) بالنسبة إلى الانعكاسات ـ حيث يتغيّر عند إجرائها إلى شيءٍ آخر (مثل تغيّر اليد اليمنى إلى يدٍ يسرى) ـ على أنّ له **يدوية**.



الشكل 15: يد الكائن الغريب ذات الإبهامَين. ليست اليد يداً يمنى ولا يداً يسرى (رسم شي فيريل).

ليس من الصعوبة صنعُ أشياءَ فيزيائية لها يدويّة. إنّ البراغي في صندوق الأدوات الذي نشتريه من المتجر العادي هي عادةً «يمينيّة اليد». يعني ذلك أن تدوير مفكّ البراغي في نفس جهة التفاف أصابع اليد اليمنى يسبّب تقدّم البرغي إلى الأمام باتجاهٍ موازٍ للإبهام. إذا نظرتَ عبر المرآة لوجدت أنّ اليدَ اليمنى قد أصبحت يداً يسرى، ولكنّ البرغي سيظلّ متقدّماً للأمام، وبالتالي إنّ الصورة المرآوية للبرغي يمينيّ اليد هي برغي «يساريّ اليد». تكمن النقطةُ الهامة في أنّ البراغي يسارية اليد يمكن صنعها بالسهولة نفسها التي نصنع بها النوعَ الآخر من البراغي، وهي منسجمةٌ تماماً مع قوانين الفيزياء؛ فلا شيءَ ينتهك قوانين الفيزياء عندما نصنع برغياً يساريّ اليد، ولا يحتاج الأمرُ أكثرَ من مجرّد تقديم طلبٍ خاص إلى صاحب المعمل كأن نقول له: «من فضلك اصنع لنا عشر دزّينات من البراغي يسارية اليد وبمقياس (8 /32)(*)».

بالنزول إلى مستوى بنيوي أعمق، نجد أنّ الجزيئات تتمتّع عادةً بتناظرات انعكاسية. يمكن للجزيء أن يكون لا متغيّراً ـ أي يشكّل أحادية ـ بالنسبة إلى الانعكاس (مثل جزيء الماء H_2O الذي يبدو نفسَه في المرآة)، ويمكن أن يتغيّر عندما نعكسه في المرآة ليتحوّل إلى جزيءٍ آخر هو شريكه المرآوي. عندما يكون الجزيء صورةً مرآوية لجزيءٍ آخر، فإننا نقول إنّ لدينا «متماكِب فراغي» (أو «إيزومير مجسّم» Stereoisomer). يحتوي زوج المتماكِبات الفراغية إذاً على شكلٍ يساري (ليفو (Levo)) وآخر يميني (ديكسترو (Dextro))، لا يختلفان بعضهما عن بعض إلاّ من خلال الانعكاس في المرآة (مثل اليد اليمنى واليد اليسرى)، فالجزيئات اليمينية هي الصور المرآوية للجزيئات اليسارية، والعكس بالعكس. تكون للمتماكِبات

(*) أي يحتوي البرغي على 8 أخاديد، بين الأخدود والآخر مسافة (1 /32) إنش.

اليمينية (أو اليسارية) كلّها الخصائصُ الكيميائية **نفسها تماماً** عندما تُمزج مع متماكبات يمينية (يسارية) أخرى، بينما تصبح للمتماكبات اليمينية (اليسارية) خواصّ كيميائية **مختلفة** ـ بالأحرى خواصّ مختلفة للمزيج الناتج ـ عندما تُمزَج مع متماكبات يسارية (يمينية) توافق الصور المرآوية للمتماكبات الأولى.

تطوّرت الكائناتُ الحيّةُ المعقّدة التي تعيش على الأرض كلُّها ابتداءً من كائنات بسيطة بدائية، ويرتبط أحدُ الدلائل المقنعة على ذلك مع يدويّة الجزيئات المكوّنة للكائنات، فنحن نتشارك مع جميع الكائنات الأخرى بمتماكبات فراغية محدّدة. عندما تشكّلت الكائنات البدائية، وقعت بعضُ الحوادث العشوائية التي جعلت إحداها تستخدم ـ مثلاً ـ جزيئاً يسارياً من أجل وظيفةٍ معيّنة. لقد تمّ هذا الاختيار بطريقة عشوائية واعتباطية ـ كما نفعل عندما نقذف قطعةَ النقد في الهواء لاختيار الوجه الذي يظهر لناـ وحدث هذا الدمجُ الذي فرضته الصدفة للمتماكب الفراغي ضمن الكائن الحيّ من خلال طفرةٍ مورّثية؛ وهكذا متى ما تمّ الاختيار فإنّ كاملَ الذرية والنسل اللاحق لهذا الكائن المنفرد سوف يرث المتماكبَ الفراغيّ نفسَه من أجل تلك الوظيفة. ومع استمرار المتتالية التطوّريّة، فإنّ جميعَ أشكال الحياة التي أُنشِئت ـ عبر طفراتٍ إضافية ولاحقة ـ من هذا الكائن البدائي، سوف ترث وتحافظ أيضاً على الاختيار العشوائي نفسِه للمتماكِب الفراغي من أجل الوظيفة المعنية. لقد انتشر الاختيارُ الأولي نحو الأمام على طول سلسلة التطوّر مع ولادةِ وبدء حياةِ الكائنات الأكثر تقدّماً. وهكذا ورثنا الاختيارَ العشوائي لرمي قطعة النقد من أجدادنا البدائيين قبل حوالي ثلاثة مليارات سنة، عندما بدأت الكائنات الحيّة الأولى بالتكوّن والتشكّل ضمن الرسوبيات الطينية لكوكب الأرض البدائي.

نذكر على سبيل المثال أنّ أغلب الجزيئات السكّرية الموجودة في الكائنات الحية على الأرض هي من النوع يمينيّ اليد (أي سكّريات يمينية)، أمّا صورُها المرآوية (السكّريات اليسارية) فيمكن صنعها بشكلٍ تجاري أو في المخابر. ومع ذلك فقد خضعت الإنزيمات الهاضمة في أمعائنا للتطوّر بحيث صارت لا تقدر إلاّ على هضم السكّريات اليمينية التي نلاقيها بشكلٍ طبيعي على الأرض، من حيث إنها الجزيئات الآتية من الكائنات الحية الأخرى التي خضعت للتطوّر كذلك في كوكب الأرض. لا تتفاعل هذه الإنزيمات اليمينية كيميائياً (بالطريقة المعتادة نفسها) مع السكّريات اليسارية، ولذلك لا يتمّ هضمُ هذه الأخيرة. بالرغم من هذا الأمر تستسيغ النهايات العصبية في حليمات الذوق عندنا السكّرياتِ اليساريةَ كما لو كانت يمينية. وهكذا من الممكن استخدامُ السكّريات اليسارية كبديلٍ عن السكّر العادي، لأن مذاقَها حلوٌ بينما لا يتمّ استقلابُها بل تُطرَحُ كليّةً من الجسم، وبالتالي لن يسبّبَ تناولُها زيادةً في الوزن أو نخراً للأسنان. وللأمانة يجب أن نذكر أنه من الضروري دوماً توقّع حدوث أعراض جانبية غير مرغوبٍ بها هنا بالتأكيد.

إنها لفكرةٌ جميلة بل آسرة أن نتخيّل رحلةً لنا إلى كوكبٍ آخر حيث ترحّب بنا كائناتٌ أو أشكالُ حياةٍ جديدة، إذ يمكن أن نتصوَّر أنفسنا وقد التقينا بكائناتٍ بشرية تشبهنا تماماً ولكنها تطوّرت مع متماكِبات فراغية أخرى، فعلى سبيل المثال، يمكن لهذه الكائنات الغريبة أن تكون قادرةً على هضم السكّريات اليسارية لا غير، وبالتالي ستحتوي قطع الجزر أو الشمندر أو اللوز الملبّس أو ألواح الشوكولا في هذا الكوكب الجديد على سكّريات يسارية فحسب. سنجلس مع مضيفينا الغرباء للاستمتاع معاً بوجبة قدّموها لنا تشبه تماماً في مذاقها الطعام الشهي المطبوخ في بيوتنا، ولكننا سنجد

لاحقاً أننا مازلنا جائعين، وأننا لم نكتسب أي فوائدَ تغذيةٍ ـ مهما كانت ـ من الوجبات الطعامية للغرباء. ومن غير المستبعد أن نجد أنفسنا ـ من أجل البقاء على قيد الحياة ـ ملزمين بالاعتماد على بديلٍ للسكّر يقوم بصنعه الغرباء خصيصاً لنا.

من المثير للاهتمام كذلك أننا نستطيع ـ من حيث المبدأ ـ تقفّي أثر سلسلة تطوّرنا مع جميع الكائنات الحيّة الأخرى على الأرض إلى كائناتٍ بدائية وحيدة عاشت على الأرض في الماضي، وذلك من خلال الكيمياء الفراغية التي تطرّقنا لذكرها. كان من الممكن وبسهولة أن يحدث التطوّر بشكلٍ مغايرٍ تماماً، فهو ـ كضربة البداية للسوبر بول(*) (Super Bowl) ـ قد تَحدَّد من خلال «قرعةِ رمي قطعة النقد»، حيث اتّحد بالصدفة كائنٌ بروتينيّ صغير مع مستقلب سكّري يميني، ثم انتشرت هذه الحادثة العشوائية على طول سلسلة الحياة في الحيوانات والنباتات وفي كلٍّ ما يعيش على الأرض اليوم. يعبّر تطوّرُ أنماط الحياة أساساً عن شكلٍ لفيزياء معقّدة تتضمّن مجموعةَ مبادئ ذات صلة بالوقائع. ولا يمكننا اليومَ فهمُ محاضرةٍ أو ندوةٍ عن البيولوجيا الحديثة ولا مشروع بحثٍ في المورّثات والصبغيات من دون أن نستوعب مفهوم التطوّر. ومن المؤكّد أنّ حرمان الأطفال من دراسة واستيعاب التطوّر عند تدريسهم مادة البيولوجيا ـ كما يحدث على سبيل المثال حتى في الولايات المتحدة في بعض المدارس الخاضعة لإداراتٍ متعنّتة ـ بما يعنيه ذلك من عدم تهيئتهم بشكل صحيح للعيش والمنافسة في العالَم الحديث، سوف يؤدي إلى

(*) مباراة في كرة القدم الأميركية تُقام كلّ سنة بين الفائز في دوري اتحاد كرة القدم الأميركية (American Football Conference) والفائز في دوري اتحاد كرة القدم الوطنية (National Football Conference)، وتُعتبَر من أهم الأحداث الرياضية السنوية في الولايات المتحدة.

تغييرات اجتماعية قد تكون جسيمة. ومن الممكن أن نتصوَّر أنّ ذلك ببساطة سيساعد في عملية الاصطفاء الطبيعي جاعلاً الأمور أسهل لكائناتٍ حيةٍ ذكية من أجل أن تحلّ محلّنا في تاريخٍ ما من المستقبل.

لنعُدْ الآن من البيولوجيا إلى الفيزياء ولنسأل: «هل العالَم الفيزيائي - أي قوانين الفيزياء - لامتغيّرٌ بالنسبة إلى التناظر المتقطّع للانعكاس؟». وبعباراتٍ أخرى: «هل قوانين الفيزياء في عالَم المرآة مطابقة لقوانين عالَمنا؟»

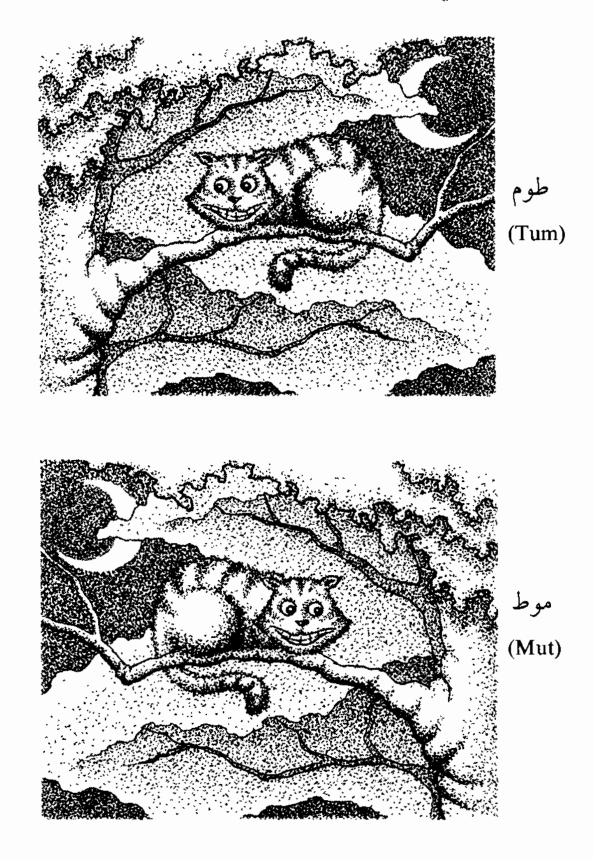
تناظر الزوجية وقوانين الفيزياء

إنّ الانعكاسات هي تناظراتٌ لإجرائياتٍ وعملياتٍ فيزيائية ديناميكية و/ أو لكائناتٍ فيزيائية أساسية (مثل الذرات) أيضاً. على سبيل المثال، إنّ قوانين إلكتروديناميك الجسيمات المشحونة وقوانين الثقالة كما نراها في العالَم المرآوي، هي مطابقةٌ للقوانين الموافقة في العالَم غير المرآوي. ندعو تناظر الفيزياء الكبير الانعكاسي هذا باسم **الزوجيّة**، فماذا نعني بقولنا إن «قوانين الفيزياء» لامتغيّرة بالنسبة إلى الانعكاسات؟

يعني تناظرُ الزوجيّة - حرفياً ورياضياتياً - في أساسه، أن ننظر إلى العالَم بكلّ ما يحتويه من إجرائيات من خلال مرآة: كما لو كنّا فعلاً في منزل المرآة مع أليس. سنرى في المرآة كائناتٍ فيزيائيةً تتحرّك وتجول فتصطدم وتتفاعل بعضها مع بعض، وهي في كل ذلك خاضعةٌ لمنظومة «قوانين فيزيائية» مشابهة جداً لمنظومة «قوانين الفيزياء» التي تصلح على الطرف الآخر من المرآة.

لنتخيّل قطّاً اسمه طوم (Tum) (موجود في عالَمنا؛ انظر الشكل 16) وهو يقفز فوق سطحٍ زَلِق - ليكن الغطاء المشمّع الجديد لسطح الطاولة - فيسقط على مزهرية ورود يوقعها لتنكسرَ على الأرض. تبقى

مقاديرُ الاندفاع والطاقة والاندفاع الزاوي كلُّها مصونةً في حادثة الصدم هذه (شريطةَ أن نأخذَ بعين الاعتبار ضياعَ الطاقة بشكل حرارةٍ وصوتٍ بالإضافة إلى مقدار الكلفة الطاقية لفصم الروابط الذرية عند تحطّم المزهرية... إلخ، فمع شَمْلِنا كلّ هذه الأمور في اعتباراتنا، تبقى الطاقةُ الكلية فعلاً مصونةً عندما تصطدم الورودُ في النهاية بالأرض). هذه هي قوانين الفيزياء ـ وكلّها تفرضها مبادئ تناظرية ـ على طرفنا من المرآة بما في ذلك نظرية نوثر.



الشكل 16: القطّ طوم وصورته المرآوية موط (رسم شي فيريل).

يوجد كذلك في العالَم المرآوي قطٌّ يشبه طوم كثيراً، ولكننا سندعوه بموط (Mut) (من الجدير بالملاحظة أنه مثل طوم «ذكرٌ» أيضاً). هذا القطّ تَزُلّ قدمُه هو الآخر فوق سطح طاولةٍ زلقٍ، فيصطدم بمزهرية ورود لتتحطّم على الأرض. يمكننا في الواقع إجراء قياسات دقيقة لحادثة الصدم هذه، فنتأكّد أنّ هناك مصونيةً كاملةً للاندفاع وللطاقة وللاندفاع الزاوي في البيت المرآوي كذلك. وبقدر ما نستطيع رؤية الأمور، يبدو لنا أنّ التناظرَ الانسحابي في المكان والزمان والتناظرَ الدوراني وغالبيةَ التناظرات الأخرى تبقى صالحةً في العالَم المرآوي أيضاً. وهكذا لابدّ أن نشرع بالإيمان بأنّ المنزلَ المرآوي ـ أي العالَم كما يُرى في المرآة ـ خاضعٌ لقوانين الفيزياء نفسِها التي يخضع لها عالَمنا تماماً.

من المهمّ التذكير هنا بأنّ الانعكاسَ هو تناظر متقطّع (ليس مستمراً)، لأننا إمّا أن نعكسَ الأمور أو لا نعكسها: فلا وجود لانعكاس قدره 0,126 وحدة انعكاس مثلاً؛ فإمّا أن يحدث الانعكاسُ كلُّه أو لا يحدث البتّة. وكما ذكرنا سابقاً، يُدعى هذا التناظر باسم تناظر **الزوجية** للقوانين الفيزيائية. بعبارةٍ أخرى، إذا كانت **الزوجية** تناظراً جيّداً، فعندها يجب أن تكون القوانينُ التي تصف العملياتِ الفيزيائيةَ كما تُرى عبر المرآة مطابقةً تماماً للقوانين التي تصف العملياتِ الفيزيائيةَ نفسَها على الطرف الآخر من المرآة.

يثير هذا كلُّه الآن سؤالاً مهماً وأكثرَ دقةً. إنّ موضوعَ خضوعِ المنزل المرآوي لقوانين عالَمنا الفيزيائية نفسها هو في نهاية الأمر فرضيةٌ قابلةٌ للخطأ والصواب، فهل الزوجية تناظرٌ حقيقي لقوانين الفيزياء؟ وكيف يمكن لنا اختبار صحة هذه الفرضية من أجل معرفة الإجابة عن السؤال السابق؟

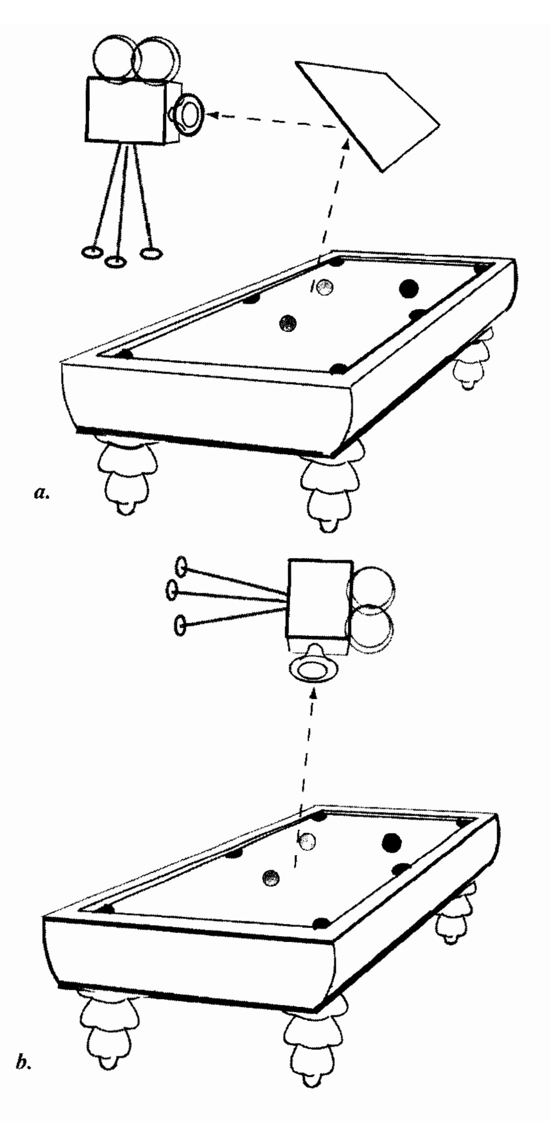
لنفترض أنّ شخصاً ما أعطاك فيلماً أو قرصاً للأفلام الرقمية

(دي في دي DVD) عن منظومةٍ فيزيائية خاضعةٍ لعمليةٍ ديناميكية. على سبيل المثال، يمكن لهذه العملية أن تكون حادثةَ صدم القطّ طوم لمزهرية الورود التي تسقط على الأرض، أو يمكن لها أن تكون إجرائيةً سهلة كحادثة اصطدام كريات بلياردو على طاولة البلياردو. مع ذلك يوجد احتمالٌ بأن يكون هذا الفلمُ قد تمّ تصويره وآلة التصوير ـ الكاميرا موجّهة بحيث **ترى انعكاسَ المنظومة في المرآة**، كما في الشكل 17. لنفترض الآن أنّ كاميرتَنا جيّدة فعلاً، وأنّ مرآتنا نظيفة وملساء تماماً (لا شقوق أو لطخاتٍ عليها)، وأنه لم يُسمَح لكَ بمشاهدة الكيفية التي تمّ تركيبُ الكاميرا وفقها ولا طريقةِ رؤيتها لطاولة البلياردو، فهل هناك وسيلةٌ يمكنك بواسطتها معرفةُ ما إذا كانت الإجرائية الفيزيائية التي تراها تمّ تصويرها عبر المرآة (كما في الصورة a من الشكل 17) أم أنها صُوِّرت مباشرةً وليس من خلال رؤية انعكاسها في المرآة (كما في الصورة b من الشكل نفسه)؟

هذا السؤال سؤالٌ عميق بالفعل، ونحتاج من أجل الوصول للحقيقة الكامنة في إجابته إلى اختزاله لمنظوماتٍ أبسط. لنتناول مرة أخرى مثالَ اصطدام القطّ بالمزهرية، ولنفترض أننا أسقطنا سهواً ذكر أنّ طوم (وهو منظومة معقّدة) لديه لطخة بيضاء على الجانب الأيمن من وجهه. يكون طوم بهذا الشكل قد «عُلِّم» بسمةٍ تميّز «يدوية يمينية». لذلك عندما نشاهد فيلماً عن اصطدام القطّ مع المزهرية، فإننا نستطيع أن نرى ما إذا كانت اللطخة على الجانب الأيمن أو الأيسر من الوجه. لو شاهدنا تلك اللطخة على جانب الوجه الأيسر سنعرف أن ما نراه هو موط ـ أي الصورة الانعكاسية لطوم ـ وعندها يمكننا التأكيد أنّ صورة القطّ قد تمّ أخذها من خلال المرآة. رغم ذلك فإنّ جوهر القضية ليس هنا، فقد رأينا أنه يمكننا من ناحية المبدأ ـ مثلما كان الحال مع البراغي اليسارية ـ أن نولّد نسلاً لقطٍ

جديدٍ اسمه أنسل (Ansel) يبدو مطابقاً لطوم تماماً، ولكن لطخته البيضاء تقع على الجانب الأيسر من وجهه. في هذه الحالة لن نتمكّن من معرفة ما إذا كان مشهد اصطدام القطّ مع المزهرية قد تمّ تصويره مع أنسل على جانب المرآة الموافق لعالَمنا أم مع موط على الجانب الآخر الموافق لعالَم أليس المرآوي! وهكذا تفقد لطخةُ الوجه قيمتَها التمييزية.

من أجل هذا، لنذهب إلى مستوى أكبر في البساطة، ولنشاهد كرات البلياردو في حالة اصطدام في ما بينها. هل نستطيع معرفةَ ما إذا كان الفلم مأخوذاً عبر المرآةَ أم لا؟ حسناً، أيكون الجواب نعم أم لا؟ في نهاية الأمر، يفضّل الفيزيائيون الذهابَ إلى أقصى حدّ في البساطة وذلك بتفحّص الجسيمات الأولية في حالة الاصطدام، وقد أجروا هذه التجارب بالفعل خلال القرن الماضي. إننا نستطيع باستعمال مجاهرِنا ذات القوة الفاصلة الكبيرة - أي المسرّعات القادرة للجسيمات الأولية - رؤيةَ حوادث الصدم الذرية والنووية والمتعلّقة بالجسيمات الأولية، وهي في أغلب الأحيان لا تكشف عن أيّ اختلافٍ بين منظومةٍ معطاة وصورتِها في المرآة. في الحقيقة - ولغاية خمسينيات القرن العشرين - قادت مثلُ تلك الملاحظات الفيزيائيين إلى الاعتقاد بأنه عندما نصل فعلاً إلى النظم الأولية، فإنّ المنظومات الفيزيائية التي لا تتكوّن من مجموعةٍ معقّدة من القواعد - مثل قواعد نشوء القطّ (التي تتضمّن قواعدَ الاصطفاء الطبيعي ومراحل عديدة من التطوّر دُمِغَت خلالها اليدويّة) - سنلاقي فيها دوماً قوانينَ الطبيعة تتمتّع بالتناظر بين اليمين واليسار. وبالتالي لن نستطيع عند هذه المستويات معرفةَ ما إذا كان الفلم مأخوذاً عبر المرآة ليُرينا فيزياءَ المنزل المرآوي، أم أنه أُخِذ مباشرةً ليعرضَ لنا فيزياءَ عالِمنا. وهكذا كان الاعتقاد سائداً بأنّ الزوجية تمثّل تناظراً حقيقياً للطبيعة.



الشكل 17: a: تصوّرُ آلةُ التصوير مشهداً عبر مرآة كما يبدو في المنزل المرآوي. b: تصوّرُ آلة التصوير المشهدَ نفسه مباشرةً كما يبدو في الجانب الموافق لعالَمنا من المرآة. (رسم CTH).

ومع ذلك ظلّ الفيزيائيون يجرون سبراً أعمقَ ضمن بحر الطبيعة، واستمرّوا بشكل منهجي يختبرون صحّة الفكرة السابقة. وبقي السؤال: هل هناك خصائص دقيقة وحذقة للجسيمات الأولية تختلف في منزل أليس المرآوي عنها في عالَمنا؟ هل نستطيع الوصول لقرارٍ جازم عمّا إذا كان فلمٌ تخيّلي عن عملياتٍ فيزيائية ذريّة أو دون ذرية مأخوذاً عبر المرآة أم لا؟

الإطاحة بتناظر الزوجية

هناك جسيمٌ يُدعى بِميزون الباي ـ ناقص أو «البَيون» (الفظْها باي ـ يون) ويُرمز له بـ π^-. نعرف اليوم أنّ البيون ليس جسيماً أولياً بل هو في الحقيقة كائن مركَّب مكوَّن من «كوارك سفلي» و«كوارك مضاد علوي»، ولكن يمكن التفكير به كجسيم أوّلي من أجل الاحتياجات الراهنة. يتحلّل الـ π^- خلال جزءٍ من مئة مليون جزء من الثانية إلى جسيمَين أوليَّين هما **الميون** μ^- **ونترينو مضادّ** حيادي الشحنة الكهربائية $\bar{\nu}^0$، فنكتب: $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}^0$.

إنّ الـ π^- جسيمٌ بـ «تدويم معدوم» (سبين ـ صفر)، ويعني ذلك أن اندفاعَه الزاوي التدويمي (السبيني) الذاتي معدوم. ويمكن اعتباره كقطرةٍ صغيرةٍ من المادة متناظرةٍ كروياً ـ مثل كرية بلياردو بالغة الصغر ـ لا تغيّر من هيئتها بأيّ طريقةٍ كانت إذا ما دوّرناها. من ناحيةٍ أخرى، يشبه كلّ من الميون μ^- والنترينو المضاد $\bar{\nu}^0$ جيروسكوباً مدوِّماً مُنَمْنَماً، حيث يسلك كلاهما مسلكَ رأس دبّوسٍ ماديّ صغير باندفاعٍ زاوي تدويمي (سبيني) ذاتي (لذلك يُدعَيان بجسيمَين بـ «تدويم $\frac{1}{2}$»، لكننا لا نحتاج إلى شرح هذه النقطة التفصيلية هنا؛ إذ إننا سنعالج تدويم ـ سبين الجسيمات الأولية بتفصيلٍ أكبر في الفصل 10).

نعرف وفقاً لنظرية نوثر والتناظر الدوراني أنّ قانونَ مصونية الاندفاع الزاوي صالحٌ دوماً، فهو صحيحٌ حتى بالنسبة **إلى الجسيمات الأولية البالغة الصغر**، لأنّ التناظر الدوراني يصحّ على جميع مقاييس المسافة في عالَمنا وفي العالَم المرآوي على السواء. وهكذا فعندما يتحلّل الميزون π^- يكون الاندفاع الزاوي الابتدائي معدوماً، وبالتالي يجب على مجموع الاندفاعَين الزاويَّين النهائيَّين لـِ μ^- ولـِ $\bar{\nu}^0$ أن يكون مساوياً للصفر. يتحتَّم إذاً على الجيروسكوبَين المصغَّرَين للميون وللنترينو المضادّ الناتجَين أن يدوّما بجهتَين متعاكستَين تماماً، بحيث يكون الاندفاع الزاوي الكلي النهائي معدوماً.

تكمن نقطةٌ تجريبيةٌ هامة ـ تمثّل السببَ في إمكانية إجراء مثل هذه التجربة ـ في أننا نستطيع إبطاءَ وحتى إيقافَ الميون السريع ثم قياس تدويمه (سبينه). من ناحية تقنية، يتحلّل الميون بدوره (خلال جزءٍ من مليون جزء من الثانية) إلى جسيماتٍ أخرى، وتُخبرنا الطريقة التي تمتدّ وتنتشر بها نواتجُ تحلّله عن مقدار تدويمه (سبينه). بما أنّ إبطاءَ الميون ثم إيقافه لا يغيّران من جهة تدويمه (سبينه) في المكان، فإننا نستطيع أن نعرف إذاً وبالضبط اتجاهَ الاندفاع الزاوي للميون (تدويمه) في اللحظة التي خُلق فيها من خلال تحلّل البيون.

وهكذا يمكننا تصميم تجربةٍ ننظر فيها إلى تفاصيل حوادث تحلّل وتفكّك جسيم الـ p^-. سنبحث أولاً عن حوادث يصدر فيها الميون **وتدويمه** (سبينه) **موازٍ ومتّفقٌ في جهته مع اتجاه حركته**، ثم سنبحث عن حوادث يكون فيها اتجاهُ تدويم (سبين) الميون **معاكساً لاتجاه حركته.** عندما يكون اتجاه التدويم (السبين) موازياً وموافقاً لاتجاه حركة الجسيم نقول إنّ **حلزونية (لولبية)** الجسيم موجبة (+)، بينما ندعوها سالبةً (ـ) إذا كان اتجاه تدويم (سبين) الجسيم معاكساً

لاتجاه حركته، فالحلزونية إذاً هي نوع من قياسات اليدوية لا أكثر.

بما أنّ الحلزونية تعبيرٌ عن اليدويّة ـ مثل اليدويّة اليمنى أو اليدويّة اليسرى ـ فإنّ حلزونيةَ أيّ جسيم **تنعكس** عندما يُنظر إليها في المرآة (انظر الشكل 18). لتبيان ذلك علينا أن نتذكّر أننا عرّفنا وبطريقة متّسقة شعاعَ الاندفاع الزاوي لجسم مدوِّم باستخدام قاعدة اليد اليمنى. لنتناول مرة أخرى لعبةَ جيروسكُوبٍ، ولْنَلْوِ أصابعَ يدنا اليمنى باتجاه دوران قاعدة الجيروسكوب، فيشير عندها إبهام هذه اليدّ إلى اتجاه شعاع الاندفاع الزاوي (عُد إلى الشكل 10). إن هذا الأمر هو عبارة عن اصطلاحٍ اعتمدناه نحن البشر، **ويجب استعماله من أجل كلّ الأشياء بطريقةٍ متّسقة خالية من التناقض**: يعني ذلك أنه علينا استعمال قاعدة اليد اليمنى من أجل الميون والنترينو على السواء. لا يجوز عكس الاصطلاحَ في أيّ مكانٍ خلال سلسلة تفكيرنا، وإلاّ فإننا سنحصل على إجابةٍ خاطئة (على سبيل المثال، يجب ألاّ ننتقل إلى «قاعدة اليد اليسرى» عندما نتحوَّل من وصف الميونات إلى وصف النترينوات. كذلك فإننا سنستخدم **دوماً** قاعدة اليد اليمنى عند رؤية منظوماتٍ مدوِّمة **حتى من أجل المنظومات التي يمكن أن تكون مشاهدتُنا لها من خلال مرآة**، حيث إننا لا نعرف مسبقاً ما إذا كنّا نرى فيلماً تمّ تصويره عبر مرآةٍ أم لا. وبعبارةٍ أخرى نحن لا نعتمد قاعدة اليد اليسرى من أجل الصور المرآوية، وذلك لعدم وجود طريقةٍ تخوّلنا سلفاً معرفةَ إن كانت هذه الصور مرآوية فعلاً أم لا).

لنأخذ الآن جيروسكوباً مدوِّماً ومتحرّكاً في اتجاهٍ ما، بحيث يكون شعاع الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) موازياً لاتجاه الحركة وجهته متفقّة معه أيضاً. ينعكس اتجاهُ الحركة في الصورة المرآوية للجيروسكوب (إذا كان متّجهاً نحو المرآة)، ولكنّ التدويمَ (السبين)

في هذه الحالة يبقى بالاتجاه نفسه ولا يختبر انعكاساً في المرآة (باستخدام قاعدة اليد اليمنى أيضاً من أجل الصورة المرآوية!). من ناحية أخرى، يمكن لاتجاه حركة الجيروسكوب أن يبقى نفسَه في المرآة، ولكنّ اتجاهَ التدويم (السبين) حينئذٍ سوف ينعكس في المرآة (كما في الشكل 18). نستنتج إذاً أنّ الحلزونية تنعكس دوماً في المرآة. وكما قلنا أعلاه تعبّر الحلزونية عن اليدويّة، وهذه الأخيرة تنعكس دائماً في المرآة تماماً مثلما تغدو يدُك اليسرى يداً يمنى في المرآة والعكس بالعكس. يمكن أن نتخيَّل أيضاً صورةً مرآوية لدَرَجٍ ملتوٍ أو لمثقب، وسنرى أنّ الحلزونية هنا تنعكس في المرآة كذلكَ (من أجل المثقب تمثّل الحلزونيةُ اتجاهَ دوران المثقب بالنسبة إلى الاتجاه الذي يصير محورُ المثقب في نهايته نقطةً حادّة صغيرة).

قام أحدُ مؤلّفَي هذا الكتاب (ليون ليديرمان) في منتصف الخمسينيات بقياس حلزونية الميونات (سالبة الشحنة) الصادرة عند تفكّك البيونات (سالبة الشحنة) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}^0$. ودعونا الآن نحاول أن نخمّنَ ماذا يجب أن تكون نتيجةُ هذه التجربة. إذا كانت الزوجيةُ تناظراً صحيحاً لقوانين الفيزياء، فإنّ كلا نوعَي الميونات ذات الحلزونية (+) وذات الحلزونية (ـ) يجب أن يصدر بالاحتمالية نفسها (لا تعطي نظريةُ الكمّ ـ كما سنرى لاحقاً ـ إلاّ مقدارَ الاحتمالية لحصول شيءٍ ما ضمن حادثةٍ محدّدةٍ). يعني ذلك أنه من أجل حوادثَ تحلّلٍ كثيرة، يجب أن نحصلَ على مقدارٍ متساوٍ للميونات الصادرة (نسبة 50 ـ 50 في المئة) من تلك التي بحلزونيّةٍ (+) وتلك ذات الحلزونية (ـ). إنّ تناظرَ الزوجية يقتضي صحةَ هذا الأمر، لأنّ البيون في أي حادثة تفكّك سيُنتج ميوناً بحلزونية محددة، بينما ستكون الصورة المرآوية لهذه الحادثة ذات قيمةٍ حلزونيةٍ معاكسة، ومنه تكون أيُّ حادثةِ تفكّكٍ للبيون مختلفةً عن صورتها

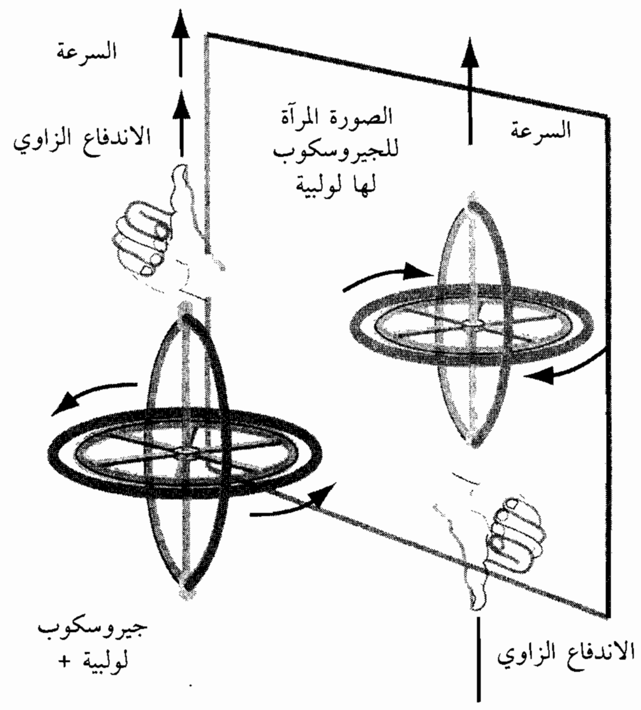
المرآوية، وبالتالي يستلزم تناظرُ الزوجية أن تعدّلَ الحوادثُ بعضَها بعضاً خلال عددٍ كبيرٍ جداً من حوادث التفكّك. بهذا الأسلوب كان أرسطو القديم سيحلّل هذه المسألة.

في الحقيقة كانت النتيجةُ التي حصلنا عليها من إجراء هذه التجربة صدمةً كبيرة: إنّ حلزونيةَ الميون الناتج عند تحلّل π^- سالبةٌ **دوماً**، أي إننا نرى دائماً حوادثَ الصورة 19 b ولا نصادف إطلاقاً حادثةً كما في الصورة 19 a!

ولكنْ لماذا نعتبر مثلَ هذه النتيجة صدمةً مفاجِئة؟ ببساطة لأنّها تقتضي أنه إذا قُدِّر لنا «مشاهدة» فيلم سينمائي - أو تصويرٍ مسجّل على دي في دي - لتحلّل π^- وصدورِ ميون بحلزونيةٍ (+) عنه، فإننا نستطيع التأكيدَ وبصوتٍ عالٍ: «إننا نرى صورةً للعملية منعكسةً عبر المرآة! ومثل هذه العملية لا يمكن أن تحدث إلاّ في منزل أليس المرآوي، وهي لا تحدث إطلاقاً على جانبنا من المرآة!». وهكذا يختلف العالَم المرآوي عن العالَم الذي نقطنه بطريقةٍ جوهرية على مستوى الجسيمات الأولية والقوى الأساسية في الطبيعة.

إنّ العالَم المرآوي - بميوناته ذات الحلزونية (+) الصادرة عن تفكّك البيون - هو بالطبع محضُ خيالٍ نظري ولا وجودَ فعلي له. تحتوي قوانين الفيزياء في عالَمنا قوى وتفاعلات غير متناظرة بالنسبة إلى الزوجية مثل «وتفاعلات القوى الضعيفة» المسؤولة عن تفكّك الـ π^-. وفي الواقع يقدّم هذا التفاعلُ مثالاً عن انتهاكِ تناظر الزوجية الذي يحدث في مختلف أرجاء تفاعلات القوى الضعيفة المسؤولة عن كثيرٍ من المظاهر والآثار الأخرى في الطبيعة. في الحقيقة إنّ التفاعلَ الذي حطّم وحوّل نجماً جبّاراً إلى فتاتٍ في المستسعرات الحرارية الفائقة (السوبرنوفا) - أي إجرائية تحلّل بيتا $p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu^0$ (بروتون زائد إلكترون يعطيان نتروناً زائداً نترينو) هو بذاته مثالٌ عن تفاعلٍ للقوى الضعيفة. وكما رأينا سابقاً تعتمد المادةُ التي

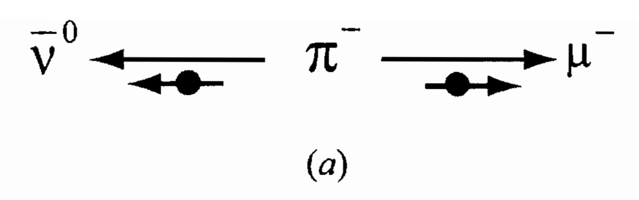
نتكوّن منها ـ وبالتالي وجودُنا كلّه ـ على وجود هذه القوى الضعيفة في الطبيعة، ولقد أدركنا الآن أنّ هذه القوى قادرةٌ على تمييز عالَمنا عن صورته المرآوية!



الشكل 18: تنعكس الحلزونية (اللولبية) دوماً في المرآة. لدينا هنا جيروسكوب بحلزونية موجبة (+)، حيث يوازي شعاع الاندفاع الزاوي كما هو معرَّف بقاعدة اليد اليمنى اتجاهَ شعاع السرعة ويتفقّ معه في الجهة. تكون حلزونيةُ الصورة المرآوية للجيروسكوب سالبةً (ـ)، حيث ينعكس اتجاه الاندفاع الزاوي كما هو معرَّف بقاعدة اليد اليمنى بينما يبقى اتجاه السرعة نفسه. إذا كان محور دوران الجيروسكوب وشعاع السرعة كلاهما متّجهَين نحو المرآة، فعندها لن ينعكس اتجاه الاندفاع الزاوي في المرآة بينما سوف تنعكس السرعة، وبالتالي سوف تنعكس هنا أيضاً الحلزونية في المرآة كما يجب أن تفعل. (رسم CTH).

من وجهة النظر التاريخية - وكما ذكرنا سابقاً - اعتقد الفيزيائيون حتى منتصف الخمسينيات أنّ الزوجية تشكّل تناظراً حقيقياً للفيزياء. أُثير لأول مرة السؤالُ عن عدم انحفاظِ الزوجية (وسنرمز لها بـ P) في تفاعلات القوى الضعيفة من قبل النظريَّين الشابَّين ت. د. لي (T. D. Lee) وس. ن يانغ (C. N. Yang) في عام 1956. كان تناظرُ الزوجية في ذلك الوقت يُعتَبر أساسياً ويمكن التعويل عليه، فهو حقيقةٌ ظاهرةٌ للطبيعة - مثل حال شريحة الخبز بالزبدة كمصدرٍ للرزق - تمّ استخدامُها ولمدة عقودٍ عديدة في تفسير معطيات الفيزياء الذرية والنووية. تَمثَّل الاختراقُ الفكري والمفاهيمي لـِ لي ويانغ في فكرةِ التمتّع الكاملِ لغالبيةِ التفاعلات التي لاقاها الفيزيائيون - مثل القوى الشديدة المسؤولة عن تماسك نوى الذرّات والقوى الكهرمغناطيسية وكذلك الثقالة - بالتناظر الانعكاسي (أي بالزوجية) مع إمكانيةِ عدم امتلاك القوى الضعيفة - في تجلّيها الخاصّ خلال ظاهرة النشاط الإشعاعي لتحلّل بيتا - لهذا التناظر المرآوي[1].

(1) T. D. Lee and C. N. Yang, «Question of Parity Conversation in Weak Interactions,» *Physical Review*, vol. 104 (1956); Jeremy Bernstein, «Profiles: A Question of Parity,» *The New Yorker Magazine*, vol. 38 (1962), and Martin Gardner, *The New Ambidextrous Universe: Symmetry and Asymmetry from Mirror Reflections to Superstrings* (New York, NY: W. H. Freeman, 1991).



(*a*)

(*b*)

الشكل 19: حلزونية الجسيمات الصادرة عن تحلّل البيون (سالب الشحنة) في التفاعل $\pi^- \to \mu^- + \bar{\nu}^0$. حلزونية الميون موجبة في a، بينما تكون سالبة في b. نشاهد دوماً الإجرائية b تحدث في المخبر، بينما لا نرى إطلاقاً الإجرائية a.

تمّ في عام 1957 الإثباتُ التجريبي لانتهاك الزوجية من قبل أحد مؤلّفَي هذا الكتاب (ليون ليديرمان) ومعاونيه عبر تقنية تفكّك البيون التي شرحناها أعلاه[2]. وبشكلٍ مستقلّ تمّ إظهارُ الأثر نفسه من قبل السيدة تشيين ـ شيونغ وو (Chien-Shiung Wu) باستخدام تقنيةٍ أخرى أكثر تعقيداً. لقد مثّل كلُّ ذلك أخباراً لها وقع الصاعقة:

(2) من أجل بعض الطرف والحكايات النادرة المحيطة باكتشاف انتهاك الزوجية في عمليّة تحلّل البَيون ـ كما في عملية تحلّل الميون ـ انظر كتاب: Leon M. Lederman, *The God Particle: If the Universe is the Answer, what is the Question?* (Boston: Houghton Mifflin, 1993).

فالتفاعلات الضعيفة ليست لامتغيّرةً أو صامدةً بالنسبة إلى عملية الزوجية (P). وهكذا تمّت الإطاحةُ بملك الزوجية! وكانت هذه فكرةً جديدةً وثوريةً في إمكانيةِ امتلاكِ بعضِ قوى الطبيعة لدرجاتِ تناظرٍ منفردةٍ خاصة بها دون غيرها.

ما قامت به السيدةُ وو في تجربتها هو مراقبةُ تفكّك الكوبالت ـ 60 (^{60}Co) النشيط إشعاعياً عند درجات حرارة منخفضة جداً وضمن حقلٍ مغناطيسي قوي. لقد مثّلت هذه التجربةُ مشروعَ تحدٍّ جبّار، استلزم جهوداً بطوليةً لمجموعات عديدة ذات خبرات متنوعة وفي مجالات مختلفة. تنطلق الإلكترونات الاعتيادية خارج معدن الكوبالت ـ 60 ناجمةً عن عمليات تحلّل ـ بيتا ضمن المادة. اكتشفت وو أنه عند وجودِ حقلٍ مغناطيسي قوي، فإنّ الإلكتروناتُ كانت تصدر في **اتجاهٍ موازٍ ومتفّقٍ في الجهة** مع الحقل المغناطيسي (لأنّ الأخيرَ عند درجات الحرارة المنخفضة يسبّب تدويرَ تدويمات (سبينات) نوى الكوبالت ويصفِّفها بحيث تغدو متراصفةً، ويحدّد تدويم (سبين) النواة نمطَ التحلّل ونموذجه). مع ذلك كانت ملاحظةُ وو كافيةً لاستنتاج وجودِ انتهاكٍ لتناظر الزوجية، إذ يَثبت في النهاية أنّ موازاةَ سرعةِ الإلكترون للحقل المغناطيسي وتراصفَها معه هي أمرٌ مماثل للحلزونية من حيث إنه يخضع لانعكاسٍ وانقلابٍ في المرآة[3]. إذا شاهدنا فيلماً أو دي ـ في ـ دي يُري الإلكترونات صادرةً من ^{60}Co باتجاهٍ معاكس للحقل المغناطيسي، فإننا نستطيع التأكيدَ حينئذْ بأنّ:

(3) بعبارة أخرى إذا نظرنا إلى المنظومة من خلال مرآة ما، فإننا سنرى أنّ الحقل المغناطيسي يظهر وقد قلب اتّجاهَه، بينما يبقى اتّجاه حركة الإلكترونات الصادرة نفس ما كان عليه. وعند استخدام المرآة بوضعيةٍ مختلفةٍ يمكن رؤية حركة الإلكترونات وقد عكست اتّجاهَها، بينما يبقى اتّجاه الحقل المغناطيسي نفسه. ينعكس التوازي (التراصف) النسبيّ لاتّجاهَي حركة الإلكترونات والحقل المغناطيسي في كلتا الحالتَين.

«ما لدينا هنا هو صورةٌ مرآوية للعملية الحقيقية لا يمكن حدوثها في عالَمنا».

تناظر قلب الزمن

لننظر مرة أخرى إلى قوانين الفيزياء من خلال مشاهدة فيلم، ولكنْ الآن عوضاً عن مشاهدته عبر مرآة فإننا نقوم بعرض الفيلم من نهايته إلى بدايته، ونسلّط ما نراه على الشاشة. من السهل فعل ذلك في أيامنا هذه عبر الضغط على زرّ الإعادة في قارئ دي - في - دي أو جهاز فيديو، إذ إننا جميعاً رأينا الفطيرةَ تنطلقُ من وجه العمّ بيرت (Uncle Bert) أو الأبراجَ القرميدية تعود من حالة حطامها لترتفعَ من جديد في وضعها الأصلي. وبخلاف حالة النظر عبر المرآة، فإنه من السهل هنا التأكّد والتصريح بأنّ ما نراه هو فلمٌ معروضٌ بالاتجاه العكسي إلى الوراء عبر المِسْلاط(*).

مع ذلك علينا من جديد توخّي الحذر عند السؤال عمّا إذا كان هذا الأمر يمثّل فعلاً مظهراً أساسياً للطبيعة أم أنه مجرّدُ علامةٍ عارضة مثل اللطخة البيضاء على وجه طوم. يعني هذا أننا استطعنا بسهولة - عند رؤيتنا لكومةِ قرميدٍ تصطفّ بشكل تلقائي لتشكّل برجاً من القرميد - القولَ وباحتمالٍ كبيرٍ جداً إنّ الفيلمَ كان معروضاً إلى الوراء عبر المسلاط، ولكنّ معرفةَ جهةِ عرض الفيلم تصبح أكثرَ صعوبةً في حالة النظم البسيطة مثل كرتَي بلياردو في حالة اصطدام فوق الطاولة. لا يبدو أنّ الحركةَ إلى الأمام أو إلى الخلف - عندما تقترب كرتا البلياردو بعضهما من بعض ثم ترتدان إحداهما عن الأخرى في اتجاهَين مختلفَين - تتغيّر كثيراً عند عرض الفيلم إلى الوراء. يبدو أنّ

(*) جهاز الإسقاط.

الصدمَ المتقدّمَ إلى الأمام في الزمن يخضع لقوانين الحركة نفسها التي يخضع لها الصدمُ المتراجِع إلى الوراء في الزمن. تبقى قوانينُ الحركة للمنظومات البسيطة بنفس الوضوح سواءٌ أُجريت بزمن متقدّم إلى الأمام أو بزمن مقلوب إلى الوراء، ولكن كيف يمكننا فعلياً إجراءُ العمليات وتطبيقُ قوانين الفيزياء في زمن مقلوب إلى الوراء من أجل اختبار هذه الفرضية؟

في الفيزياء كثيراً ما نتوقّف عند نقطةٍ ما ثم نحلّ مسائل شرطية من نوع «**إذا ـ فـ**». لنتناول السؤالَ التالي في فيزياء الجسيمات الأولية (ولندعوه Q1): **إذا** كان الجسيم عند اللحظة t_1 في الموضع x_1 متحركاً بسرعة V، **فـ**أين سيكون في اللحظة t_2؟ الجواب هو $x_2=x_1 + V(t_2-t_1)$.

لنتناول الآن السؤالَ **المقلوب في الزمن** (Q2): «إذا كان الجسيم عند اللحظة t_1 في الموضع x_2 متحركاً بسرعة V- (تعكس السرعاتُ إشاراتِها عندما نقلب اتجاهَ الزمن، وهذه حقيقةٌ ربّما تعرفها من خلال تشغيلكَ الـدي ـ في ـ دي إلى الوراء أو عند رؤيتكَ لسيارةٍ تسير إلى الخلف في طريق عامة)، فَأين سيكون عند اللحظة t_2؟» بالتفكير السليم نرى أنّ الجواب يجب أن يكون x_1، وفعلاً نجد بعد إعادةِ ترتيبٍ بسيطة في صيغتنا أعلاه أنّ $x_1=x_2 + V(t_2-t_1)$.

هذه حقيقةَ هي الإجابةُ الصحيحة عن السؤال المقلوب في الزمن، ومع ذلك فإنّ الجوابَ هنا نجم عن حلّ المسألة الأصلية بعد إعادة ترتيبٍ رياضياتية بسيطة. من الواضح أنّ جوابَ سؤال الزمن المتقدِّم يحتوي على جواب سؤال الزمن المتراجع، لأننا نحصل على الجوابَين من المعادلة الفيزيائية نفسها! إذاً يبقى وصفُنا الفيزيائي للمنظومة كما هو سواء أتقدّم الزمانُ إلى الأمام أم تراجع إلى الوراء. لقد وضعنا في Q2 شروطاً ابتدائيةً **معاكسةً** لها في Q1؛ ويعني ذلك

أننا وضعنا الجسيم عند البداية في الموضع x_2 (وهو المكان الذي وصل إليه الجسيم عند النهاية في Q1) ثم عكسنا جهة الحركة باستبدال V- بـ V. نجد أنّ الجسيمَ في Q2 وبعد مرور فترة زمنية مكافئة سيكون في x_1 (أي في المكان الذي ابتدأ منه في Q1). يبيّن هذا المثال قدرتَنا على إجراء فيزياء مقلوبة في الزمن من حاجة إلى قلب اتجاه انسياب الزمن فعلاً، إذ يكفي أن نعكس اتجاهات الحركة وأن نبادل بين الموضعَين الابتدائي والنهائي. بعبارةٍ بسيطة تمثّل الرحلة بالقطار من نيويوركَ إلى فيلادلفيا نسخةً مقلوبةً في الزمن للرحلة من فيلادلفيا إلى نيويورك.

نتساءل غالباً عن السبب الذي يجعل المنظومات الأكثر تعقيداً تبدو كأنها توحي بوجود اتجاه مفضّلٍ للزمن ـ أي وجود **سهم للزمن** ـ بينما لا تفعل ذلك مقابلاتُها البسيطة. لماذا يسقط برجُ القرميد ويتحطّم متحوّلاً إلى كومة قرميدٍ وغبار، بينما لا «تسقط» كومة القرميد والغبار إلى الأعلى لتشكّل برجاً؟ ما هو السبب في ذلك مع أنّ حادثةَ صدمٍ مقلوبةٍ في الزمن لكريّتَي بلياردو تبدو مطابقةً تقريباً لحادثة صدمٍ بزمنٍ غير مقلوب؟

ترتبط الإجابةُ عن هذا التساؤل بالطبيعة الشرطية من نوع «**إذا ـ فَـ**» للمسائل الفيزيائية. يتضمّن أيُّ شيءٍ نراه شروطاً ابتدائية خاصّة بالإضافة إلى قوانينَ حركة. إذا كان لدينا في البدء حاويةٌ مليئةٌ بالغاز وفتحنا صمّامَها، فإنّ الغاز سينطلق منها وسيملأ الغرفة. تتمثّل الشروط الابتدائية هنا بحقيقةِ أننا ابتدأنا بحاويةٍ مملوءةٍ بغازٍ مضغوط يمكن تحضيره ـ بواسطة مكبس مثلاً ـ بسهولة. مع أنّ قوانينَ الحركة التي تحكم انفلاتَ الغاز صامدةٌ ولامتغيّرةٌ تماماً بالنسبة إلى قلب الزمن، فإننا لا نرى أبداً الوضعَ الموافقَ لقلب الزمن، أي إننا لا نشاهد إطلاقاً غرفةً مليئةً بغازٍ يقوم من تلقاء نفسه بالتجمّع والدخول

إلى الحاوية لتعبئتها. ببساطة من الصعب جداً أن تتوفّر لنا شروط ابتدائية متمثّلة بهذا العدد الهائل ـ الذي يفوق المليارات ـ من جزيئات الغاز بمواضع وسرعات مناسبة لكي تتجمّع كلّها في الحاوية. إنّ مثل هذه الشروط الابتدائية لا تنتهك قوانين الفيزياء، ولكنّ احتمال تحقّقها ضئيلٌ للغاية بشكلٍ منافٍ للعقل. وبالطريقة نفسها سيبدو اصطدامُ مجموعةٍ من كريات البلياردو بعضها ببعض بطريقةٍ تجعلها منتظمةً ومتراصفةً ضمن تشكيلةِ «المخلعة»(*) أمراً غريباً جداً، بينما لا توجد أيّ غرابة على الإطلاق في ضربة البداية التي تصدم الكريات وتبعثرها بعيداً عن تشكيلة المخلعة. إنّ الشروط الابتدائية هي التي تجعل وضعاً اعتيادياً يبدو غيرَ مألوفٍ أبداً عندما نقلبه في الزمن.

عند مناقشة فيزياء نظم معقّدة، يمكننا إدخال مفهوم إحصائي يُدعى بـ**الأنتروبية (القصور)** يقيس درجة العشوائية للمنظومة. تبقى الأنتروبية في وضعِ التوازن الهادئ ـ مثل حالةِ شوربةِ بصلٍ ساخنة موضوعة في وعاءٍ حافظٍ يمنع نفوذ الحرارة ـ ثابتةً عبر الزمن. أما في أوضاع عدم التوازن العنيفة ـ كما يحدث عند تحطيم الزجاج أو عند الانفجارات ـ فإنّ الأنتروبية تزداد دوماً. بشكل أساسي تزداد الأنتروبية ـ باعتبارها قياساً للعشوائية ـ دائماً عندما يقود وضعٌ ابتدائيٌّ منتظَمٌ جداً إلى حالةٍ نهائية غير منتظمة البتّة من خلال القوانين الطبيعية للفيزياء. تُدعى حقيقةُ ازدياد الأنتروبية أثناء جميع العمليات والإجرائيات ـ أو ثباتِها في أحسن الأحوال عند وضع التوازن ـ بـ**القانون الثاني في الترموديناميك**.

(*) أداة تعذيب قديمة تشبه في شكلها الإطار المثلثي الشكل الذي نضع ضمنه جميعَ كريات البلياردو عند بدء اللعبة.

الآن لا يعني ما قلناه أنّ المنظومات المعقّدة لا يمكن أن تتطوّر إلى حالات أخرى منتظمة مع تحقيقها لـ «القانون الثاني»، بل إنها - بالملاحظة - يمكن وكثيراً ما تفعلَ ذلك في الواقع. تتشكّل في منظومةٍ تحوي بخارَ ماءٍ يخضع للتبريد قطراتٌ متكاثفةٌ سائلةٌ لها تنظيمٌ وترتيبٌ إحصائي أكبر (عشوائية أقلّ) من الحالة الغازية الأصلية. ومع استمرار التبريد ستتحوّل القطرات إلى حالاتٍ مرتّبة أكثر وبعشوائية أضأل هي بلّورات الجليد. لكنْ خلال إجرائية التبريد هذه، سمحنا للطاقة بأن تتسرّب إلى خارج بخار الماء (على شكل إشعاع أي فوتونات مثلاً). وعندما تتبعثر هذه الطاقة الخارجة في الفضاء، فإنها سوف تشغل توزيعاً أكثر عشوائية (أي أنتروبية أكبر) مخلّفةً وراءها منظومةً جزئية صغيرةً من قطراتٍ متبرّدة (أنتروبية أقلّ). بالنتيجة تكون الأنتروبية الكليّة قد ازدادت مع أنّ منظومةً جزئية بأنتروبية قليلة قد تمّ تشكيلها. وكمثال مشابه، إذا حوَت هذه الأخيرةُ على تشكيلةٍ معينة من الجزيئات مثل النوويدات (النيوكليوتيدات) وهي اللبنات الأساسية للحمض النووي الريبي المنقوص الأوكسيجين (أي الـ DNA)، فيمكن لها أن تحاولَ صنعَ نسخٍ من نفسها باستعمال كيمياء معقّدةٍ تقتضي استهلاكَ وإطلاقَ طاقاتٍ متزايدة إلى الفضاء. ومرة أخرى تزداد الأنتروبية الكلية مع حصولنا على منظوماتٍ جزئية أكثر تعقيداً بقيت معنا؛ ويمكن في النهاية تكوينُ كائنٍ بشري جالسٍ في مكانٍ ما متسائلاً عن (وقلقاً من) السبب الذي يجعل انسيابَ الزمن يبدو في اتجاه واحد. (إذا) خُلقت المنظومة الجزئية المعقّدة (فإنها) تقدر على التطوّر بطريقة تزداد معها أنتروبيتها: كأن تتصدّع أو تتفكّك أو أن تختفي[4].

---

(4) كملاحظةٍ جانبية يجب الانتباه إلى أنّ هناك مظهراً مميّزاً آخرَ لأنواع الأسئلة التي نسألها في الفيزياء. لا نصادف أبداً - في أيّ صياغةٍ فيزيائية نعرفها - قضيةَ النقطة الخاصة في الزمن التي ندعوها «الآن». ومع ذلك نشعر نحن البشر بوجودِ شيءٍ ندعوه «الآن». فهل =

ولكن هل يمثّل قلبُ الزمن تناظراً حقيقياً للطبيعة صالحاً حتى على المستوى المجهري من أجل الجسيمات الأولية؟ هل توصف جميعُ العمليات الفيزيائية من خلال معادلاتٍ تصف بدورها العمليات المقلوبة في الزمن؟ هل يمكننا إلقاء هذا السؤال مثلما فعلنا في حالة الزوجية وإيجاد الإجابة واختبارها تجريبياً؟ في الواقع إننا نستطيع فعل ذلك، وتشكّل الإجابة مرةً أخرى صدمةً كبيرة: تنتهك القوى الضعيفة اللاتغيّرَ عبر قلب الزمن ـ مثل انتهاكها للزوجية ـ ولكننا نحتاج لفهم ذلك إلى إدخال مفهوم **المادة المضادة**.

اللاتغيّر عبر قلب الزمن والمادة المضادة

إنّ إحدى أهمّ النتائج اللافتة للنظر لنظرية إينشتاين في النسبية

= «الآن» هي مجرّد وهم؟ بما أنّ هذا سؤال محيّر، فإننا نمنحه مسحةً من العمق وندعوه بـ «مسألة الـ N» (الحرف الأول من كلمة «الآن» بالإنجليزية: (Now). تخبرنا النسبية الخاصة بانعدام الوجود المطلق للـ «الآن» في الكون، لأنّ مراقبين مختلفين في جمل مقارنات عطالية مختلفة لن يتّفقوا على أيٍّ من الحوادث الواقعة في أماكن مختلفة هي الحوادث المتواقتة التي تحدث في الوقت نفسه. لذلك لا يمكن ـ حتى ضمن عقولنا ـ أن يكون هناك تواقتٌ وتزامنٌ كاملان على مقاييس زمنية فائقة القصر من رتبة حاصل قسمة قدّ ومقاس دماغنا على سرعة الضوء. إنّ دماغَنا مع ذلك بطيءٌ إلى حدٍّ ما، حيث تستغرق الاتصالاتُ ما بين العصبونات أجزاءً من الميلّي ثانية لإتمام رحلتها، ولذلك قد يكون هناك نوعٌ من عمليةِ أخذِ الوسطي عبر الزمن، وهو يحدث في الدماغ ويعطينا هذا الشعور والإدراك الحسّي بمعنى «الآن». هل لحظة «الآن» إذاً ذات وجود حقيقي وهي جزء من قوانين الفيزياء؟ إنّ واقعَ كون هذا السؤال ضبابياً ومبهماً لهذه الدرجة ربّما يخبرنا عن الإجابة: لا يوجد أيّ دورٍ مميّز لـ «الآن» في قوانين الفيزياء. إنّ الإدراكَ الحسّي للشعور بـ «الآن» ذو صلةٍ بالعمل المُفعَم بالضبابية وبالوظيفة الغامضة لـ «الوعي» (ما سمّيناه سابقاً بـ «مسألة الـ «C»»). بما أنه ليست هناك لغاية الآن نظرية كاملة (حسب معلوماتنا) ـ أو حتى أيّ نموذج جيّد قادر على التنبّؤ ـ بخصوص الوعي، فإننا لا نستطيع معالجة هذا السؤال إلى حدّ أبعد ممّا ذكرناه، فيما خلا القول إنّ الوعي ظاهرةٌ بالغة التعقيد. ونعتقد أنّ الإجابة ستتضمّن كون مسألتَي الـ «N» والـ «C» مرتبطتَين معاً.

الخاصة هي أنها تتنبّأ ـ عند دمجها مع النظرية الكمومية ـ بوجود المادة المضادة. يُعَدّ التنبّؤ النظري بالمادة المضادة ـ من قِبَل بول ديراك (Paul Dirac) في عام 1926 ـ مع الإثبات التجريبيّ اللاحق على وجودها أحدَ أهمّ النتائج العلمية في القرن العشرين. سنرى سببَ ضرورة وجود المادة المضادة وسندرسها بالتفصيل في الفصل 10، ولكن لنقُل الآن إنها تنجم عن التناظرات المتقطّعة للزمان والمكان؛ وبالتالي ترتبط المادة المضادة بشكلٍ وثيق مع تناظرَي الزوجية وقلب الزمن للمكان والزمان. في الحقيقة أعطى ريتشارد فاينمان تفسيراً جديداً عام 1949 لمعنى الجسيم المضاد في أنه جسيمٌ يتحرّك «إلى الوراء في الزمن».

وهكذا يوجد لأيّ صنفٍ من الجسيمات الأولية في الطبيعة صنفٌ موافق من الجسيمات المضادة. على سبيل المثال، للإلكترون ذي الشحنة السلبية جسيمٌ مضادّ يُدعى بـ**البوزيترون** بشحنةٍ موجبة. للبوزيترون كتلة الإلكترون نفسها، وعندما يتصادم مع الإلكترون فإنّ كليهما يختفيان مخلّفَين وراءهما فوتونات من أجل تحقيق مصونية الطاقة والاندفاع في حادثة الصدم. إنّ وجودَ المادة المضادة حقيقةٌ لا تقبل الشك في الفيرميلاب، حيث يقذف التيفاترون[*] بروتوناتٍ في اتجاه معيّن لتصطدمَ بشكلٍ رأسيّ مع بروتونات مضادّة تُقذَف في الاتجاه المعاكس. يمكن لمثل هذه الاصطدامات أن تخلقَ زوجاً من نوعٍ جديد من المادة وضدّها كأن تخلق كواركاً علوياً وكواركاً علوياً مضاداً.

يقودنا وجودُ المادة المضادة إلى تناظرٍ متقطّعٍ آخر في الطبيعة:

(*) التيفاترون هو آلة مسرّعة في مخبر الفيرميلاب تصل فيه طاقة البروتونات المسرَّعة إلى مرتبة الـ Tev 2/1 (2\1 تريليون إلكترون فولط).

وهو التناظر الموافق لاستبدال الجسيمات المضادة بالجسيمات في أيّ تفاعلٍ. يُدعى هذا التناظر بـ «**ترافق الشحنة**»، ويُرمَز له بـ C. يقتضي هذا التناظر بقاءَ قوانين الفيزياء في عالَم الجسيمات المضادة نفسَ ما هي عليه في عالَم الجسيمات. على سبيل المثال، سيكون للهدروجين المضادّ ـ المكوَّن من بروتونٍ مضادّ وإلكترون مضادّ (بوزيترون) ـ الخصائص نفسها التي لذرة الهيدروجين الاعتيادي، مثل مستويات الطاقة وأحجام ـ قياسات المدارات الإلكترونية (البوزيترونية) ومعدّلات التحلّل ثم الطيف الطاقي.

لقد سبق لنا ملاحظة أنّ التناظر المرآوي ـ الذي يُرمَز له بـ P الحرف الأول من كلمة الزوجية Parity بالإنجليزية ـ يتوقّف عن كونه تناظراً صالحاً عند مقاربة العمليات المتضمِّنة للقوى الضعيفة. إضافةً لذلك رأينا أنه يمكن تعريفُ عمليةِ تناظرٍ متقطِّع آخر ـ يُدعى بـ T ـ تقلِبُ جهةَ انسيابِ الزمن؛ أي تستبدل t- بـ t في جميع المعادلات الفيزيائية وتبادل بين الشروط البدائية والنهائية، لنحصل على النتائج المتّسقة نفسها.

إذا كان C تناظراً صحيحاً للطبيعة، فعندها يجب على أيّ جسيم مضادٌ في إجرائية فيزيائية ما سلوكُ المسلكِ نفسه تماماً لجسيِمه القرين المناظر شريطةَ أن نستبدل بجميع الجسيمات في الإجرائية جسيماتِها المضادّة. يجب الانتباه إلى أنه لا إشارةَ هنا إلى تدويمات (سبينات) واندفاعات الجسيمات التي تتعلّق بالتحويلات المكانية وبتحويل الانعكاس P. يصدر الميون في تفاعل تحلّل البيون $\pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu}^0$ دوماً بحلزونيةٍ سالبة، فإذا طبَّقنا عملية C على هذه الإجرائية فإننا نحصل على الإجرائية المضادّة التالية: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu^0$، حيث استبدلنا بالجسيمات جسيماتِها المضادّة مع الإبقاء على التدويمات (السبينات) والاندفاعات كما كانت في

الإجرائية الأصلية، وبالتالي يُفترَض أن تبقى حلزونية الميون المضادّ في الإجرائية المضادّة سلبيةً.

تمّ اختبار هذا الأمر تجريبياً في عام 1957 بُعيد التخلّي عن تناظر الـ P بالنسبة إلى تفاعلات القوى الضعيفة، وعندما أُجريت التجربة **لم** تكن حلزونية الميون المضادّ الصادر سلبيةً؛ بل كانت بالأحرى موجبة. وهكذا تنتهك التفاعلاتُ الضعيفةُ ـ مثل تلك التي تحدث أثناء تحلّل البيونات والميونات ـ تناظرَي الـ C والـ P معاً. نعبّر عن ذلك بالقول إنّ استبدالَ الجسيمات المضادة بالجسيمات في كلّ مكانٍ من إجرائية معيّنة لا يمثّل تناظراً لها، لأنه يؤدي إلى نتائج معاكسة (صور مرآوية) في ما يخصّ حلزونيات الجسيمات المتضمَّنة في الإجرائية.

وبشكل طبيعي أطلّت بوجهها المسلَّمةُ المثيرةُ للاهتمام في أنه عندما نجري عملية الانعكاس في المرآة (عملية P التي تعكس جميع قيم الحلزونّيات) ونغيّر الجسيمات إلى أضدادها في الآن نفسه (العملية C)، فربّما يمكن لهذا التناظر المركَّب أن يمثّل تناظراً صحيحاً للطبيعة. تُدعى عملية التناظر المركَّبة هذه بِـ: CP. عند تطبيق الـ CP على الميون سالبَ الشحنة **ويساري اليدوّية** (أي له حلزونية سالبة)، فإننا نحصل على ميون مضادّ شحنته موجبة **ويدويته يمينيةّ** (أي له حلزونية موجبة). إنّ للميون المضادّ في عملية تحلّل البيون $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu^0$ حلزونية موجبة فعلاً (فهو يمينيّ اليدويّة)، وهكذا نكون قد بيّنّا أنّ الـ CP يمثّل تناظراً صحيحاً في إجرائية تحلّل البيون. سُرّ الفيزيائيون عند سماعهم لهذه الأخبار! إذ يبدو أننا اكتشفنا تناظراً أعمقَ للطبيعة يربط بين الانعكاس المكاني وبين هويّة الجسيمات وأضدادها.

قُدِّر لهذه السعادة أن تكون قصيرة الأمد، فقد تبيّن في عام

1964 من خلال تجربةٍ جميلة (تجربة فيتش ـ كرونين Fitch-Cronin) متضمّنة لجسيماتٍ أخرى تُدعى بميزونات الـ K حيادية الشحنة (وهي كائنات مركَّبة يحوي كلٌّ منها زوجاً من الكواركات أحدهما كوارك غريب والآخر كوارك سفلي مضادّ أو زوجاً منها أحدهما كوارك سفلي والآخر كوارك غريب مضادّ) أنّ الـ CP ليس صامداً (لامتغيّراً) وأنّ مصونيته غير محققة. يعني ذلك أنّ فيزياء القوى الضعيفة ليست غير متغيّرة عند إجراء عمليَّتَي الـ C والـ P معاً. لقد كانت الرغبة في معرفة تفاصيل الأساس الذي وراء كسرِ تناظر الـ CP هذا سبباً في نشوء وتعريف ميدانٍ حديثٍ لبحوثٍ متقدّمة في الفيزياء خلال السنين الثلاثين الأخيرة. ونحن لا نعرف لغاية الآن كيفية حدوث هذا الكسر، ولكننا تعلّمنا أنه لو كان الـ CP تناظراً صحيحاً للطبيعة لكان كوننا مختلفاً جداً عمّا هو مألوف لنا، ولَما وُجدت المنظومة الشمسية ولا النجوم ولا المجرّات ولا نحن البشرَ ـ على الأرجح ـ ولَما كنتَ هنا تقرأ هذا الكتاب. من أجل هذا كلّه، لابدّ في النهاية من أن نعتبره أمراً جيداً ذلك الانتهاك لتناظر الـ CP في الطبيعة(5).

في الحقيقة يخبرنا انتهاكُ تناظر الـ CP أنّ الجسيمَ ومضادَّه يتصرّفان

---

(5) في الحقيقة يتأرجح جسيم ميزون الـ K (K^0) وجسيمه المضادّ ($\overline{K}^0$) بين بعضهما البعض جيئة وذهاباً: $K^0 \longleftrightarrow \overline{K}^0$ لو كان تناظر الـ CP صحيحاً، لكان طور الاهتزاز من K^0 إلى $\overline{K}^0$ **مطابقاً تماماً** لطور الاهتزاز المعاكس من $\overline{K}^0$ إلى K^0. ولكننا نجد تجريبياً أنّ طور الاهتزاز من K^0 إلى $\overline{K}^0$ يختلفُ قليلاً جداً ـ بجزءٍ من الألف جزء ـ عن طور الاهتزاز من $\overline{K}^0$ إلى K^0، انظر: J. H. Christenson, [et al.], «Evidence for the 2 Pi Decay of the K^0 Meson,» *Physical Review Letters*, vol. 13, nos. 138-140 (1964).

إنّ هذه الإجرائية التحلّلية ليست صامدةً (لا متغيّرةً) بالنسبة إلى تحويل الـ CP. تمّ التأكّد كذلك مباشرةً من انتهاك تناظر الـ T في تجارب دقيقة تتضمّن ميزونات الـ K حيادية الشحنة الكهربائية. يبقى التحويل التناظري المشترك والإجمالي لـ CPT معاً تناظراً لعمليات التحلّل هذه. وقد ظهر الآن في تجارب معاصرة انتهاكُ الـ CP في جسيماتٍ أخرى ـ تُدعى ميزونات الـ B- تحتوي على الكوارك الثقيل القعري (أو الجميل).

بطريقتَين مختلفتَين قليلاً بعضهما عن بعض. وكما قُلنا يُعَدّ هذا الانتهاكُ أمراً مرحَّباً به في كوننا، بل إنّ وجودَه شرطٌ مسبَقٌ للإجابة عن سؤالٍ آخرَ لا يزال بمثابة اللغز: ما هو السبب في احتواء الكون ظاهرياً على المادة الاعتيادية فقط وليس على المادة المضادة؟ إذا عُدنا إلى اللحظات البدائية للانفجار العظيم ـ عندما كان الكون حارّاً بشكلٍ هائل (أكثر حرارةً من أيّ مقياسِ طاقةٍ توصّلنا إلى سبره في المخابر) ـ فإنّ النظريةَ تتنبّأ بوَفرتَين نسبيّتَين متساويتَين لكل من المادة الاعتيادية والمادة المضادّة في ذلك الحين. ولكن عندما أخذ الكونُ بالتبرّد وبسبب وجودِ انتهاكِ الـ CP، أمكن لبعض البقايا الجسيمية الثقيلة جداً للمادة أن تتحلّل بطريقةٍ مختلفةٍ قليلاً عن مقابلاتِها من المادة المضادّة. وقد سمح هذا اللاتناظر بترجيحِ إنتاجِ زيادةٍ صغيرة للمادة الطبيعية (مثل الهيدروجين) مقارنةً بالمادة المضادة (الهيدروجين المضاد) عند نهاية سلسلة التحلّل. بعد ذلك مع تبرّد الكون أكثر فأكثر والذي رافقه إفناء كلّ ما تبقّى من المادة المضادة والقسم الأكبر من المادة لبعضهما البعض، ظلّت هذه الزيادةُ الضئيلة للمادة الاعتيادية باقيةً. ثم تطوّر هذا الفائضُ الضئيل الذي لم يوجد له ندّ مقابلٌ من المادة المضادة وتحوّل ليغدوَ مجملَ ما نراه في الكون اليوم (بما فيه نحن بذاتنا). تكمن المسألةُ البحثية المتبقيّة في أنه بينما نحتاج إلى انتهاك الـ CP من أجل تفسيرِ حقيقةِ احتواءِ الكون على المادة وليس على المادة المضادّة، فإننا لغاية اليوم نعتقد أننا لم نكتشف بعد التفاعلات الخاصّةَ التي تُنتِج هذا الانتهاك. يبقى أثرُ انتهاكِ الـ CP ـ الذي شوهِد أول مرة عند ميزونات الـ K حيادية الشحنة ويُشاهَد الآن في كثيرٍ من عمليات التفكّك الخاصة بجسيماتٍ أخرى ـ إشارةً مثيرةً وآسرةً لأشياءَ أخرى غريبة يمكن أن نكتشفها في المستقبل. ويدرس كثيرٌ من الباحثين في مختلف أصقاع الأرض هذا الأثرَ في الوقت الراهن، ولكن يبدو أنّ الشيطانَ لا يزال يمكن في التفاصيل.

تجميع قطع الأحجية معاً

عندما ترمي قطعةَ نقد مسبوكة بشكلٍ جيد أي «غير منحازة»، فإنّ حادثتَي ظهورِ الوجه والقفا متساويتا الاحتمال. يساوي مجموع احتمالَي ظهور الوجه والقفا الواحدَ الصحيح، لأنّ مجموعَ الاحتمالات لحدوثِ أيّ شيءٍ يجب أن يكون مساوياً للواحد الصحيح، وإلاّ فنحن لا نتكلّم بشكلٍ له معنى عن احتمالات الحدوث، فماذا يعني أن يكونَ احتمالُ ظهورِ الوجه عند رمي قطعة النقد مساوياً لـ 3/2 إذا كان احتمالُ ظهور القفا 3/2؟ هذا مجرّد هراء.

إنّ ميكانيكَ الكمّ ـ كما سنرى لاحقاً ـ يحلّ في النهاية محلَّ فيزياء نيوتن وغاليليو، وهو يقدّم تنبّؤاتٍ احتماليةً لا أكثر عن نتائج الحوادث في الطبيعة. وقد ثبُتَ الآن في نهاية التحليلات أن هناكَ شرطاً ضرورياً في ميكانيك الكمّ من أجل أن يكون الاحتمالُ الكلّي لجميع النتائج الممكنة في إجرائيةٍ معطاةٍ ما مصوناً (أي أن يبقى المجموعُ الكلي لاحتمالات النتائج الممكنة مساوياً للواحد الصحيح)، وهو أن يكونَ اجتماعُ عمليات التناظر المتقطّعة (CPT) تناظراً صحيحاً لأيّ عملية فيزيائية. يعني ذلك أنه إذا ما استبدلنا بالجسيمات جسيماتِها المضادّة (C) وعكسنا الإجرائيةَ عبر المرآة (P) ثم أدرنا الكاميرا إلى الوراء في الزمن، فإنّ ما نتنبّأ به من نتيجةٍ يجب أن يكونَ مطابقاً للنتيجة التي تعطينا إياها الطبيعةُ من خلال قوانين الفيزياء. يبدو أنه عندما نجمع C وP وT سويةً، فإنّ ما نحصل عليه يمثّل تناظراً صحيحاً للعالَم ـ على الأقل ضمن حدود المستوى الراهن للحساسية التجريبية ـ يُدعى بتناظر الـ CPT، ويغدو بالتالي التفسيرُ الاحتمالي لميكانيك الكمّ صالحاً. لم يرِد أيُّ إثباتٍ تجريبي على انتهاك الـ CPT، وكثيرٌ من الناس يعتبر إمكانيةَ ذلك بالغة

الضآلة. إذا فشل الـ CPT في أن يكون تناظراً حقيقياً، فإنّ قيم الاحتمالية ـ مع مرور الزمن ـ لن تكون محفوظة، ممّا يقوّض مفهومَ الاحتمالية في النظرية الكمومية ويدفعنا في النهاية إلى التخلّي عنه. ومع ذلك علينا أن نتساءل أنه لو كان انتهاك الـ CPT غايةً في الضآلة، فهل سيكون بإمكاننا ملاحظته؟ هذا سؤال تجريبي في نهاية الأمر.

لنفترض أنه عند رمي قطعة النقد مرّ ثقبٌ أسود صغيرٌ بالقرب منها والتهمها. طالما كنّا نرى قطعةَ النقد، فإنّ مجموعَ احتمالَي ظهور الوجه والقفا مساوٍ للواحد. ولكن علينا الآن أخذُ إمكانية اختفاء القطعة في الثقب الأسود بعين الاعتبار. عندما تتجاوز قطعة النقد أفقَ الحدث الموافق للثقب الأسود، فإنها ببساطة تكفّ عن الانتماء لكوننا وعن الوجودِ فيه بشكلٍ ذي معنى. هل يمكننا تعديلُ وضبط تفاسيرِنا الاحتمالية لتتلاءمَ مع إمكانية حصول هذه النتيجة؟ هل سنلاقي يوماً ما قيماً سالبةً للاحتمالية؟ هل تلتهم الثقوب السوداء الاحتماليةَ في ميكانيك الكمّ من حيث إنه يمكن لها أن تُخلَق وتفنى آنياً في الفراغ ذاته؟ هل هناك علاقة تربط بين تناظر الـ CPT أو ربّما بين انتهاكِه (في حالة وجوده) وبين أحد الأسئلة الغامضة ذات الطبيعة الكونية مثل ذاك المتعلّق بأصل الكون نفسه؟ لقد بلغنا الحدود ولكننا لا نعرف بعد الإجابةَ عن هذه الأسئلة.

الفصل التاسع
التناظر المنكسر

من أين أتيت وما هي طبيعتك أيها الشكل المقيت؟

جون ميلتون (John Milton)،

الفردوس الضائع (*Lost Paradise*)، الكتاب 2، السطر 681

التناظرات موجودةٌ بكثرة في الطبيعة ولكنها قد تكون مخفيةً عن العِيان. يعني ذلك أنّ التناظرَ قد يبدو **منكسراً** بسببِ تشكيلةٍ معيّنة تأخذها المنظومة أو بسبب البنيةِ الخاصة التي تكتسبها حالةُ المادة أو كنتيجةٍ للوضع الكلّي الإجمالي للكون بكامله. يسمح التناظرُ بوجودِ تشكيلاتٍ متنوّعةٍ ومختلفةٍ للمنظومة، ولكنها كلّها تكون ممكنةً وباحتمالاتٍ متساوية. على سبيل المثال، من الصعبِ ملاحظةُ التناظر الانسحابي للكون الذي نعيش فيه وذلك لأنّ الشمس موجودةٌ في الجوار القريب منا؛ إذ يوحي هذا الموضعُ الخاصّ للشمس بوجودِ مركزٍ مفضَّل للكون (أو على الأقلّ هكذا فكّر الأرسطُوِيّون). بينما في الحقيقة وجودُ الشمس في موضعها هو مجرّد حادثة كونية ـ وخيار آني ـ اصطفَت هذا الموضعَ من بين عددٍ لانهائي من المواقع المتكافئة ـ التي يمكن لأيّ نجمٍ أن يقيم فيها ـ ضمن الكون اللامتغيّر انسحابياً.

في الواقع هناك أشياءٌ عديدة في الفيزياء يمكن أن تكون فيها تناظراتٌ غير ظاهرةٍ للعيان. لنتناول الإلكترون الذي كثيراً ما نتكلم عنه، وهو الجسيمُ المشحونُ كهربائياً الأكثرُ أساسيةً. هناك جسيمٌ ـ ذكرنا وجوده أيضاً ـ يُدعى بالميون. هذا الميون مطابقٌ للإلكترون في كثيرٍ من المظاهر، ولكنه أثقل منه بمئتَي مرّة (وهو يتحلّل فعلياً بشكل سريع خلال جزءٍ من مليون جزء من الثانية إلى إلكترون ونترينو بواسطة التفاعلات الضعيفة). لا شكّ أنّ تطابقَ المظاهر بين الإلكترون والميون يغرينا بفكرة وجوبِ وجودِ تناظرٍ بينهما مع تحويلٍ تناظريٍّ موافق ينقل الإلكترون إلى ميون والعكس بالعكس. ومع ذلك يبدو أنّ الاختلافَ الكبير في كتلة هذين الجسيمَين يقف في وجه وجود هذا التناظر المأمول بينهما، لأنهما يبدوان متباينَين كثيراً من ناحية الكتلة، فهل هناك فعلاً تناظرٌ أساسي في هذا المجال ولكنه مخفيٌّ بطريقةٍ ما؟ أم ببساطة لا يوجد أيّ تناظرٍ حقيقي بين هذين الجسيمَين الأوليَّين؟ من الصعب معرفة الإجابة الصحيحة عن هذا السؤال بشكلٍ أكيد جازم.

ولكنْ رغم ذلك يمكن للتناظر أن يوجد بالفعل ـ وإن كان هذا بشكلٍ خفيّ ـ في بعض النظم التي لا تبدو للوهلة الأولى أنها تتمتّع به، بل إنه بمستطاع العلماء فهمَ كيفية حدوث الانكسار الظاهري للتناظر من خلال رؤية آثارٍ قاطعةٍ لا لبس فيها وبقايا من وجوده تزوِّدنا بالمعلومات عمّا حصل حينئذٍ. تُدعى هذه الظاهرة باسم **الكسر التلقائي للتناظر**. في الحقيقة من المرجَّح أنّ الكون بدأ حياتَه متوازناً بشكل متناظر بالغ الفخامة والبهاء كما لو كان في فردوس رياضياتي متناظر في جنان عدن. من الجائز أنّ الانفجار العظيم قاد إلى **حادثة كسرِ تناظرٍ** ضخمة وقعت في اللحظات الزمنية الأولى التالية له، ومن الممكن أن يكون كسرُ التناظر الكبير هذا قد أعطانا الضخامةَ الهائلةَ في الزمان والمكان التي يتمتّع بها كوننا ـ والمقارِبة لحالةِ فراغٍ وخواءٍ كئيبَين ـ من خلال إجرائية تُدعى باسم «التضخّم». تتمثّل عودتُنا إلى

فردوس جنان عدن في إنجاز المهمة النظرية الخاصة بإعادة إنشاء تلك الحالة الابتدائية الأنيقة وبالغة التناظر.

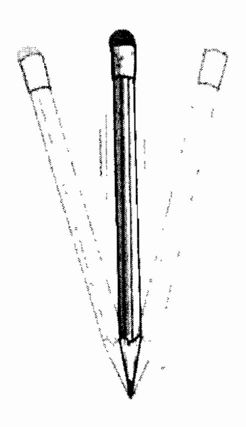
قلم رصاص جاثم على رأسه المدبَّب

في إحدى الحفلات جلس طفلٌ صغير على طاولةٍ واقعة في مركز دائرةٍ جلست على طول محيطها عدة فتياتٍ صغيرات. كان الطفل يرغب بالرقص مع إحدى أولئك الفتيات، فكيف سيقوم باختياره؟ ينمّ اختيار أيّ واحدةٍ من الفتيات عن كسرٍ لتناظرِ الخيارات العديدة من الفتيات ذوات الجاذبية المتساوية، وهو ما يجب فعله بطريقة عادلة وديمقراطية. لم تكُن هناك زجاجةٌ من أجل تدويرها، ولكن كان هناك قلم رصاص مبريّ جيداً موجود على سطح الطاولة.

يضع الطفلُ قلمَ الرصاص في وضع قائم بحيث يتوازن على رأسه الرصاصي المدبَّب. تتوازن قوةُ الثقالةَ ـ التي تسبّب عادةً سقوطَ القلم على جسمه ـ مع ردّ فعل سطح الطاولة ومع إمساك الطفل للقلم عند الوضع الشاقولي تماماً، فتُحذَف جميع آثارها. وبحذرٍ شديد يُرخي الطفل قبضته على القلم، وتظلّ الثقالة تمارس تأثيرها باتجاه الأسفل تماماً، فلا يميل القلم عن وضعه الشاقولي إلى أيّ جهة مميّزة. يبقى القلم معلّقاً هكذا لمدة ثانية أو ثانيتَين، فتخيّم مشاعر القلق والتشويق على الغرفة، إذ يبدو أنّ القلمَ ـ ولعدة لحظاتٍ ـ يتحدّى الطبيعةَ والمنطقَ بأن يظلَّ جاثماً ومرتكزاً ـ وإن بشكلٍ متقلقل ـ على حافته الحادة لزمنٍ كأنه سرمدي.

وأخيراً يحدث أمرٌ ما، قد يكون ناجماً عن اهتزازٍ صغيرٍ على الطاولة نتيجةً لهزةٍ أرضية أصابت مدينةَ هونغ كونغ (Hong Kong)، أو تالياً لمرور تيارٍ هوائي ضئيلٍ شرع في الحركة بسبب عطسةٍ بعيدة في مدينة شيكاغو (Chicago) أو بسبب فراشةٍ رفَّت بجناحَيها في غابةٍ مدارية رطبة وبعيدة ضمن أدغال جمهورية كوستا ريكا (Costa

(Rica، أو ربّما بسبب الدمدمة الثقالية لقذائف فوتونية في حربٍ بين الكواكب في مجرّة بعيدة. المهمّ أنّ القلم يبدأ بالمَيلان بشكلٍ خفيفٍ جداً غير ملحوظٍ في البدء نحو اتجاهٍ لا يمكن التنبّؤ به ويبدو اعتباطياً، ثم يسقط القلم. يصل القلم بعد ارتدادة أو ارتدادتَين إلى وضع السكون، فتشير ممحاته الخضراء إلى اتجاهٍ من الواضح أنّ «القدر» قد اختاره بشكلٍ كيفي عشوائي. ينظرُ الطفل إلى الفتاة الصغيرة الجالسة في الاتجاه الذي أشارت إليه ممحاة القلم، فيتقدَّم إليها ويطلبها للرقص. لقد تمّ الاختيار الآن، وقام القلمُ **بكسر تناظرٍ** موجود، وهو التناظر بين الفتيات العديدات الجميلات الجالسات على محيط الدائرة واللواتي أراد الطفل الرقص مع إحداهنّ. وطريقة اتّخاذ الخيار كانت عشوائية وبشكلٍ تلقائي، ولذلك تُدعى مثل هذه الظاهرة باسم الكسر التلقائي للتناظر.



الشكل 20: قلم رصاص مرتكزٌ على رأسه الرصاصي المدبَّب. تتمتّع هذه المنظومة (بما في ذلك الثقالة) بالتناظر الدوراني حول المحور الشاقولي عندما يكون القلم متوازناً بارتكازه على رأسه، ولكنّ وضع التوازن هذا غير مستقرّ. سرعان ما يقع قلم الرصاص في اتجاه كيفي مسبّباً كسراً تلقائياً للتناظر.

يوجد بالفعل نوعٌ من التناظر عندما يكون القلم جاثماً في وضعه العمودي، إذ إنّ شريكات الرقص المُمكنات كلّهنّ متكافئاتٌ في ما بينهنّ من ناحية قيمة احتمال اختيار إحداهنّ، فهناك إذاً تناظرٌ دوراني للفتيات حول المحور الشاقولي لجسم القلم، وهو تناظرٌ متقطّع إذا كان هناك عددٌ صحيحٌ محدودٌ من أولئك الفتيات[1]. كذلك تتوازن قوة الثقالة فيزيائياً مع بقية القوى في المنظومة، فتؤول المحصّلة تماماً إلى الصفر عندما يأخذ القلم وضع الشاقول بالضبط. ويكون هناك تناظر دوراني مستمر حول محور القلم للمنظومة، حيث إنّ أيّ دورانٍ حول المحور الشاقولي لن يغيّر شيئاً في المنظومة ولا في طاقتها الثقالية الكامنة.

ومع ذلك لابدّ من الانتباه إلى أنّ المنظومة هنا غير مستقرّة، فالحالة التناظرية الموافقة لارتكاز القلم على رأسه المدبَّب غير طبيعية وتوافق تشكيلةً ذات «طاقة عالية». سيجد القلمُ عبر السقوط طريقَه إلى تشكيلةٍ أخرى موافقة لطاقة كامنة أخفض، وبعد ذلك السقوط سيشير القلم إلى اتجاه معيّن في الفضاء يمكن له أن يكون أيَّ واحد من الاتجاهات، فالتناظر الدوراني يقتضي تكافؤ جميع الاتجاهات المحتمَلة التي يمكن للقلم أن يشير إليها، ولكن في النهاية يتمّ الاختيار بشكل كيفي لاتجاهٍ معيَّن واحد. وهكذا يُكسَرُ التناظر الدوراني حول المحور الشاقولي للقلم عبر الاتجاه الذي اختار القلم عشوائياً أخذَ منحاه: إنّ فتاةً واحدةً فقط يتمّ اختيارها للرقص مع أنّ جميعَ الفتيات كانت لديهنّ الفرصة نفسها ليتمّ اختيارهنّ.

في الحقيقة يبدو أنّ هناك تناظراتٍ مفقودةً ظاهرياً ضمن قوانين الطبيعة، فما هو سببُ كونِ القوى الضعيفة ضعيفةً، بينما القوى الكهرمغناطيسية أشدَّ قوة منها، وتليها القوى الشديدة الأقوى بين

---

(1) يُدعى هذا التناظر بتناظر «Z_N» المتقطّع، إذا كانت هناك N فتاة صغيرة.

الجميع؟ لماذا توجد ثلاثة أبعاد مكانية لا غير نستطيع تدويرَ مزهرية الورود حولها أو نسافر وفقها؟ ما الذي يقرّر أيَّ تناظرٍ من بين التناظرات يبقى صالحاً وأيَّها ينكسر؟ أين ذهب مجملُ التناظر (الممكن)؟

ثم ألا توجد طريقة للخروج أكثرَ أناقةً من كسر التناظر التلقائي؟ وهل يمكن لقوانين الفيزياء التي نراها تحكم الكون ـ أي قوانين الجسيمات الأولية وقواها التي تقود في النهاية انفجاراتِ السوبرنوفا الجبّارة وتؤدي إلى إنتاج الكربون والآزوت وتتحكم بالتطوّر النهائي للكائنات البشرية ـ أن تكون خاضعةً بدورها إلى قواعد متناظرة تماماً يتمّ كسرها عشوائياً وتلقائياً؟ هذه أسئلةٌ ممتازة، ويبدو أنّ الإجابة عنها ـ جزئياً على الأقلّ ـ هي بالإيجاب. إضافةً إلى ذلك يظهر أنّ أثرَ كسرِ التناظر على الكون ككلّ يكون درامياً بشكلٍ عام.

أحجار المغناطيس

أحجارُ المغناطيس هي مخالفة للحدس، ومع ذلك فإنها تقدم لنا مقداراً وافراً من التسلية، لأنها تتضمّن ظاهرةً تبدو كأنها تتحدّى السير الطبيعي للأشياء. لذا كان القدماءُ يظنّون بأنّ هناك لغزاً كامناً في أصولها أو أنها من عمل الشيطان. تتكوّن أحجارُ المغناطيس الدائم الأكثرُ شيوعاً في الطبيعة من معدن خام يُدعى بالمغنتيت مؤلّف من خامة أكسيد الحديد الأسود Fe_3O_4. وتتركّب الأحجار المغناطيسية المعدنية البرّاقة غالباً من خليطة تُدعى بـالألنيكو (Alnico) تحتوي على الألمنيوم والنيكل والكوبالت. أما الأحجار المغناطيسية الأكثر قوة فهي تحتوي على عناصر الأتربة النادرة مثل الساماريوم (Samarium) والنيوديميوم (Neodymium).

تبعاً للأساطير اليونانية تمّ اكتشاف المغناطيس من قبل راع ـ طفلٍ يوناني اسمه ماغنوس (Magnus) لاحظ أنّ بعض الخاماتَ المعدنية في الصخور أو في الأحجار كانت تجذب المسامير والأوتاد

الحديدية. وقد ذكر الفيلسوف لاكريتوس لاحقاً في كتاباته أنّ لمثل هذه الأحجار قوى غير اعتيادية، فهي تتجاذب أو تتنافر في ما بينها. ومن الممكن أن يكون الصينيّون هم الذين اخترعوا أولى البوصلات من المغناطيس قبل ذلك بسنين عديدة[2].

لوحظ في القرن الثالث عشر في أوروبا أنّ أحجار المغناطيس تحتوي دوماً على نهايتَين طرفيّتَين دُعيتا بـ**قطبَي المغناطيس**. ينجذب أحد قطبَي المغناطيس ـ ولنسمّه القطب «الشمالي» ـ إلى قطب المغناطيس الآخر «القطب الجنوبي»، بينما ينفر من أيّ «قطبٍ شماليّ» آخر. لاحظ الأوروبيّون كذلك أنه تحت شروط معيّنة دقيقة يتوجّه أحدُ قطبَي المغناطيس ويشير بشكل طبيعي نحو نجم قطب الشمال. واستفاد الأوروبيون من ذلك في الملاحة عندما استخدموا البوصلات، لأنّ النهايةَ الطرفيةَ المشيرةَ للشمال كانت تدلّ دوماً على اتجاه قطب الشمال سواء أكان ذلك خلال ضوء النهار أم في الليل حتى لو كانت السماء ملبّدة بالغيوم مما يعيق رؤية النجوم. استخدم كولومبس (Columbus) البوصلةَ عندما أبحر عبر المحيط الأطلسي، ولاحظ أنّ إبرتها تنحرف قليلاً عن الشمال الجغرافي الصحيح (كما تعرّفه النجوم) وأنّ هذا الانحراف كان يتغيّر خلال الرحلة. أدرك العلماء في القرن السادس عشر أنّ مغناطيس البوصلة يشير دائماً إلى جهة «الشمال»، لأنّ كوكب الأرض بذاته هو مغناطيس ضخم[3].

---

(2) Paul Doherty, «2000 Years of Magnetism in 40 Minutes,» Technorama Forum Lecture, www.exo.net

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 8 حزيران/ يونيو 2004).

(3) إنّ قطبَ مغناطيس إبرة البوصلة الذي يشير «باتّجاه الشمال» ـ المدعوّ بـ «القطب الشمالي» للمغناطيس ـ يأخذ منحىً في جهة «القطب الشمالي المغناطيسي للأرض»، وبالتالي يكون الأخير في الحقيقة «قطباً مغناطيسياً جنوبياً» للأرض إذا نظرنا إليها كمغناطيس!

لقد بيّنت ملاحظاتُ كولمبس إذاً أنّ القطب الشمالي المغناطيسي لا يتطابق مع القطب الشمالي الدوراني للأرض! وفي الحقيقة على مدى تاريخ الأرض كان القطب الشمالي المغناطيسي لها يغيّر مكانه، بل كان القطبان الشمالي والجنوبي يبادلان في بعض الأحيان موقعَيهما فينقلب نتيجةً لذلك مجمل الحقل المغناطيسي الأرضي. إنه لأمرٌ لافتٌ للنظر أنه ليست لدينا لغاية الآن نظرية كاملة ودقيقة عن سبب كون الأرض مغناطيساً كبيراً، ولا عن سبب تغيّره الدوريّ على مدى القرون العديدة بحيث يعكس اتجاهَه كلَّه في بعض الأحيان بشكلٍ درامي عنيف.

نصادف في وقتنا الراهن أحجاراً من المغناطيس تُستخدَم على أبواب الثلاّجات والبرّادات[*] (Refrigerator Magnets)، وهي زهيدة الثمن ومتوفِّرة بأحجامٍ وأشكالٍ متنوّعة، وبالتالي تُعَّد أحجارَ مغناطيسٍ مثاليّةً من أجلِ التسلية وإجراء التجارب البسيطة عليها. في غالبية الأحيان نحصل على تلك الأحجار المغناطيسية مجاناً كـ «دعاية» من بائعي المحلات التجارية في الجوار القريب. يكون بعضها مستوياً ومرناً كأنه نوع من الطباعة يوجد عادةً على قفا بطاقة الزيارة لسمسار عقاراتٍ أو لمطعم يقّدم البيتزا، بينما يمكن لبعضها الآخر أن يُكسى برسوم تزيينية أو بتُمَيْثِيلات بلاستيكية أو أن يُلصَق بزخرفاتٍ دعائية. إذا نزعنا تلك الزخرفات الدعائية البلاستيكية ـ مثل وجه المهرّج المحاط بأنواعٍ مختلفة من الآيس كريم أو مثل رقم هاتف طبيب الأسنان الملتصَق بسنّ بلاستيكي ـ التي تحتوي على المغناطيس بداخلها، فإنه سيبقى لدينا شيءٌ أسودُ بشكل الخاتم

(*) قطع تزيينية أو زخرفية يوجد داخلها مغناطيس صغير مرتبط بها كي تُلصَق على باب الثلاّجة أو البرّاد.

ينجذب بشكل انقضاضي إلى هيكل الثلاّجة المعدني أو إلى باب خزانة تصنيف الملفّات. يشعر أكثرُنا بالميل إلى اللعب مع هذه الأحجار، فنحن نرغب بالإحساس بالقوة الموجودة بين زوجٍ منها وهما ينقضان بعضهما على بعض في أوضاعٍ معيّنة ويدفعان بعضَهما بعضاً متباعدين في أوضاع أخرى، فذلك الأمر يجعلهما يبدوان كأنهما مملوءان بالحياة. لقد فكّر بعضنا بلا شك بإمكانية **الرفع المغناطيسي** (ماغليف (Maglev))، وحتى ببعض التطبيقات المفيدة مثل القطارات عالية السرعة العاملة بواسطة ذلك الرفع المغناطيسي.

قرّر صديقنا شيرمان (Sherman) القيامَ بمشروعٍ علمي، فحصَل على حجرَي مغناطيسٍ ثلاّجة ـ برّاد، وجعلهما في الوضعية التي يلتصق فيها أحدُهما بالآخر ليشكلا مغناطيساً واحداً أكبر، ثم قام بحذرٍ شديد بإشعال موقده المخبري الغازي كي يسخِّن زوجَ الحجرَين المغناطيسيَين إلى درجة حرارةٍ عالية نسبياً. لاحظ شيرمان أنه عندما أصبح الحجران حارَّين، ضَعُفَت قوى تجاذبهما وانفكّ التحامُ المغناطيسَين فانفصلا أخيراً بعضهما عن بعض. وتبيَّن لشيرمان من خلال مسكه حجرَي المغناطيس الساخنين بواسطة ملقطَين أنّ قوةَ الجذب التبادلي بين المغناطيسَين قد اختفت تماماً. لقد **تدمّرت** مغنطةُ حجرَي مغناطيس البرّاد، وأُزيلت **بفعل الحرارة!**

عندما برد المغناطيسان بعد برهة من الزمن، وعادت درجة حرارتهما مساويةً لدرجة حرارة الغرفة، ظلّت القوة المغناطيسية مختفيةً. ومع ذلك حينَ جلب شيرمان مغناطيساً آخرَ أكثر قوةً (وكان ممغنَطاً بشكل كامل) ووضعه بالقرب من حجرَي مغناطيس البرّاد ـ الباردَين والميّتَين ـ حتى جعله يلامسهما فيزيائياً، فإنه رأى ـ ويا للعجب! ـ أنّ مغناطيسَي البرّاد قد تمغنطا مرة أخرى. وجد شيرمان كذلك ـ من خلال تفحّصه الدقيق لهما ـ أنه قد تمّت «إعادة

شحنهما» بحقول مغناطيسية تشير إلى الاتجاه نفسه للمغناطيس الذي لمساه. وهكذا عاد مغناطيسا البرّاد إلى الحالة التي إذا وُضعا فيها معاً فإنهما يمكن أن يلتصقا ببعضهما ليشكّلا زوجاً واحداً ملتحماً من جديد.

أعاد شيرمان بعد ذلك تسخينَ حجرَي المغناطيس، ومرة أخرى اختفت القوة المغناطيسية. عندما وُضع الحجران وهما ساخنان بالقرب من المغناطيس الكبير القوي لم ترجعْ القوة المغناطيسية. ولكنْ حينَ تركهما شيرمان الآن يبردان بالقرب من المغناطيس القوي، فإنه وجد أنّ حجرَي المغناطيس بعد التبريد «أُعيد شحنُهما» إذ عادت إليهما قوتُهما المغناطيسية.

بدا كلُّ هذا الاختفاءِ للمغنطة وعودةِ ظهورها أمراً غامضاً بالفعل، وكأنه شعوذةٌ وسحرٌ مميَّزان من أحد كتب مغامرات هاري بوتر (Harry Potter). يبدو أنّ هناك نوعاً من «الروح» (أو «الجوهر») في حجرَي المغناطيس يختفي ويتلاشى بفعل الحرارة، ولكن يمكن إعادته إلى مادّتهما بطريقة معيَّنة. هل تسيل هذه الروح من المغناطيس الكبير إلى المغناطيسَين الصغيرَين الحارَّين عندما يبردان؟ ألا يمكن أن يكون لهذه الروح المغناطيسية قوى عِلاجية تساعد على الشفاء من الأمراض؟

في الواقع ـ حتى في عصرنا الراهن الذي يتَّصِف بالتنوير العلمي ـ قاد ذلك السلوكُ المُفعَم ظاهرياً بالألغاز لحجر المغناطيس إلى ممارسة نوع من السحر والشعوذة الجديدة. لقد غدت «المعالجةُ بالمغناطيس» مهنَةً تدرّ كمياتٍ كبيرةً من النقود تتجاوز المليارات من الدولارات على مستوى العالَم. وتُباع بشكلٍ خاصّ أحجارٌ مغناطيسية ذات حقول ضعيفة على أملِ أنها ستخفّف من الآلام المزمنة أو حتى

ستشفي أمراضاً مستعصية[4]. لا نعرف ـ نحن الفيزيائيين الذين تمّ تدريبنا على أن نكون شكّاكين مرتابين لا نمنح الثقة إلاّ بعد التأكّد واليقين ـ أيّ تفسيرٍ فيزيائي أو بيولوجي يدعم هذا النوعَ المزعوم من المعالجات بالمغناطيس. وفي الوقت الحاضر لا يمكننا وضع أساس علمي للزعم بأنّ هذه المعالَجةَ التي تستخدم حقولاً مغناطيسية ضعيفةٍ هي معالجة ناجعةٌ فعلاً، عدا عن إمكانية تحسّن حالة المريض بالإيحاء النفسي لا غير. في واقع الأمر الفرصتان متساويتان في أن تكون هذه المعالَجة مفيدةً أو ضارّةً، وفي أغلب الأحيان فإنها لا تفعل أيَّ شيءٍ على الإطلاق.

لاحظ روبرت ل. بارك (Robert L. Park) أنّ «أحجارَ المغناطيس المستخدَمة في المعالَجة» مماثلةٌ أساساً لأحجار مغناطيس البرّاد المرنة والمستوية والمستعمَلة في بطاقات الزيارة. قام روبرت باختبار زوجِ أحجارٍ من «مجموعة المعالَجة المغناطيسية» التي كلّفت حوالي خمسين دولاراً. كانت أحجارُ مغناطيس المعالَجة ضعيفةً في قوتها المغناطيسية لدرجة أنها فشلت في رفع عشر ورقاتٍ موضوعةٍ ضمن ملفّ ذي قبضة معدنية في خزانة التصنيف. يعني ذلك أنّ الحقول المغناطيسية لهذه الأحجار بالكاد تخترق الجلد البشري. لذلك كتب روبرت: «لا تمتلك أحجار المغناطيس هذه أيَّ قدراتٍ علاجية، بل إنها لا تستطيع حتى بلوغَ منطقة الأذى. يكلّف اقتناءُ هذه الأحجار عادةً أقلّ من تكلفةِ زيارة طبيبٍ، وبالتأكيد إنها لا يمكن أن تسبّب ضرراً مباشراً. لكن المعالجة

---

(4) Robert L. Park, «America's Strange Attraction: Magnet Therapy for Pain,» *Washington Post* (8 September 1999).

انظر ايضاً: «Magnet Therapy: What's the Attraction?» *Science Daily* (9 September 1999), www.sciencedaily.com

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 8 حزيران/ يونيو 2004).

بالمغناطيس يمكن أن تكون خطيرةً، إذا قادت الناس إلى الامتناعِ عن اتّباع معالَجة طبيّة ضرورية»[5].

رغم ما ذكرناه، هناك بعض الكائنات الحية التي يبدو أنها حسّاسة للحقول المغناطيسية. ترغب بعض أنواع البكتريا (المسمّاة بالجراثيم اللاهوائية (Anaerobic Bacteria)) بتجنّب الأوكسيجين، وهي تستفيد من الحقل المغناطيسي الأرضي للإحساس بالاتجاهات. عندما تعوم هذه البكتريا بالغة الضآلة في المياه فهي لا تشعر بالثقالة لخفّتها، ولكنها ـ نتيجةً لاحتواء جسمها على حبيباتٍ من المغنتيت ـ تستطيع استخدام الحقل المغناطيسي لتعرفَ الاتجاه «نحو الأسفل»، وذلك من أجل الابتعاد عن سطح المياه المشبع بالأوكسيجين والتوجّه نحو كائناتٍ حية أخرى تعيش في الأعماق الأكثر انخفاضاً. يمكن أن يكون حمامُ الزاجل ـ وحتى النحل المنتِج للعسل ـ يستعمل أيضاً المغنتيت في جهازه العصبي المركزي من أجل تزويده ببوصلة تفيد للملاحة.

ينجم الحقل المغناطيسي لأيّ مغناطيس عن الذرّات المنفردة التي يتكوّن منها. تمتلك الإلكترونات التي تدور حول النواة في الذرة **اندفاعاً زاوياً مدارياً وآخرَ تدويمياً (سبينياً)** صرفاً (ذاتياً) وفقاً لقواعد ميكانيك الكمّ. يُعطينا اجتماعُ حركتَي الإلكترون المدارية والتدويمية

---

(5) Robert L. Park: «America's Strange Attraction: Magnet Therapy for Pain,»; *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud* (New York: Oxford University Press, 2000).

انظر أيضاً المجموعة الأسبوعية لتحميل روبرت بارك في معهد الفيزياء الأميركي (American Institute of Physics) والمعنونة: «What's New?», www.sceincedaily.com

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 8 حزيران/ يونيو 2004).

(السبينية) **الاندفاعَ الزاويَّ الكليّ** للإلكترون. تولّد الحركة التدويمية والمدارية للإلكترون تياراً كهربائياً صغيراً يولّد بدوره حقلاً مغناطيسياً ضئيلاً. وهكذا يمكن للذرة نفسها أن تسلك مسلكَ مغناطيس، ويحدّد اتجاها الاندفاعَين الزاويَّين المداري والتدويمي (السبيني) معاً جهةَ الحقل المغناطيسي للذرة. في النهاية يصبح للذرة قطبان «شمالي وجنوبي»، وبما أنّ الذرات المختلفة تمتلك تشكيلاتٍ متنوّعة من الإلكترونات في مداراتها فستكون لها خصائص مغناطيسية مختلفة.

عند درجات الحرارة المرتفعة يكون للمادة ذات المغنطة الحديدية التي تحتوي على ذرات الحديد (Fe) ـ مثل المغنتيت ـ ترتيبٌ عشوائي ورصفٌ كيفي لمغانطِها الذرية الداخلية. ترتدّ الذرات بعضها عن بعض مغيّرةً من انتظامها ضمن «الحمّام الحراري» للاهتزازات البلّورية والإشعاعات الفوتونية عند درجات الحرارة العالية. عندما تبرد المادة تبدأ الذرات بالاستقرار والسكون، وتشرع بالانتظام وترتيب نفسها من خلال التفاعلات المتبادَلة بينها وبين الذرات المجاورة. تنشأ في المواد ذات المغنطة الحديدية وحداتٌ جزئية تُدعى بـ**نطاقات المغنطة**. يحوي كلّ نطاقٍ ملياراتٍ من الذرّات مرتّبة بحيث تشير أقطابُها الشمالية كلّها إلى الاتجاه نفسه.

عندما تبردُ مادة المغناطيس ـ في غياب أيّ حقول مغناطيسية في الجوار ـ فإنّ النطاقاتِ المختلفةَ سوف تشير إلى اتجاهات عشوائية تماماً نتيجةً للتناظر الدوراني. مع ذلك هناك اتجاه مميَّز داخلَ كلِّ نطاقِ مغنطة تمّ اختياره وتشكُّله تلقائياً: تماماً كحال قلم الرصاص الذي سقط على الطاولة من وضع ارتكازه على رأسه الرصاصي المدبَّب. يؤثّر المغناطيسُ الصغير لذرة منفردة ضمن البيئة المحيطة به الآخذة بالبرودة على جارِه ليجعلَ هذا الأخير يشير إلى اتجاهه نفسه،

ثم يؤثّر هذان الاثنان بدورهما على مغانط ذرية أخرى لتنضمّ إليهما. لا يصل مدى هذا الاصطفافِ المتّسعِ إلاّ لمسافة محدودة حيث تلتقي حدودُه مع حدود نطاقِ مغنطةٍ آخرَ. يشبه الأمرُ إذاً حالةَ تشكيل حزبٍ سياسي يبدأ بالمئات من الأعضاء ثم ينضم إليه الآلاف فالملايين من الأعضاء بآراءٍ متشابهة، ولكنّ هذا يصطدم لاحقاً مع نطاقِ حزبٍ آخرٍ حيث تكون الآراءُ داخلَه متراصفةً بدورها لكنْ في اتجاهٍ آخر!

إذا طبّقنا حقلاً مغناطيسياً قوياً على مادةٍ ذات مغنطة حديدية (أو إذا قمنا بتبريد هذه المادة المغناطيسية الحديدية بوجود حقلٍ مغناطيسي قوي في الخلفية)، فإننا يمكن أن نجبر جميعَ النطاقات على الاصطفاف والتوجّه جميعاً نحو الاتجاه نفسه. عندما نزيل الحقلَ المغناطيسي المطبَّق أو الموجودَ في الخلفية فإنّ النطاقاتِ تظلّ مصطفّةً ومتراصفةً. وحيث إنّ جميعَ نطاقات المغنطة المنفردة تشير الآن نحو اتجاه واحد، فهناك حقلٌ مغناطيسي قوي يصدر عن المادة التي أصبحت بذلك مغناطيساً فعلياً.

من الممكن أن يكون قد خطر على بالك ـ وأنتَ تفكّر بدلالة أقطاب المغناطيس ـ أنّ هناك شيئاً مريباً ومشكوكاً فيه بالنسبة إلى قطعة المغناطيس الحديد. يستلزم انتظامُ وتراصفُ المغانطِ الذرية أن يكون **القطبُ الشمالي** لذرة منفردة مصطفاً إلى جانب **القطب الشمالي** للمغناطيس الذريّ المجاور (إلى اليمين أو إلى اليسار). مع ذلك ـ كما قلنا سابقاً وكما ستبيّن لك سريعاً التجربةُ مع أحجار مغناطيس البرّاد ـ فإنّ هذا الأمر يخالف ما تفعله المغانط عادةً. إنّ الأقطابَ الشمالية (أو الجنوبية) تتنافر في ما بينها، بينما تنجذب إلى الأقطاب الجنوبية (الشمالية في الحالة المقابلة). لذلك يجب على قوة التراصف بين الذرات في قطعة المغناطيس الحديدي أن تكون أكبرَ ما يمكن في الاتجاه الشاقولي، بحيث يكون القطبُ الشمالي لذرّة

منفردة ما بمواجهة القطب الجنوبي للذرة الواقعة أعلاها تماماً. وحدوث هذا الأمر هو ظاهرةٌ معقّدةٌ ذات خصوصية معيَّنة ترتبط في آخر الأمر مع ميكانيك الكمّ. تُمثّل الموادُ ذات المغنطة الحديدية حالةً خاصةً، إذ إنّه في الواقع نادرةٌ هي المواد ذات المغنطة الحديدية في الطبيعة. إنّ بعضَ المواد تكون ذاتَ **مغنطة مسايرة،** حيث تسلك الذراتُ المنفردةُ مسلكَ مغانط كما في حالة المغنطة الحديدية، ولكنها تتفاعل بشكل ضعيفٍ مع مجاوراتها أو تميل إلى الارتصاف بشكل مضادّ مع الجوار، أي إنّ القطب الشمالي يصطفّ إلى جانب القطب الجنوبي وهكذا، وبالتالي لا يتولّد أيُّ حقلٍ مغناطيسي صافٍ. يمكن لهذه الذرّات أن تنتظم وتتراصف مع وجود حقلٍ مغناطيسي خارجي، ولكن هذا الاصطفاف يختفي بزوال الحقل الخارجي. تمتلك ـ من ناحيةٍ أخرى ـ جميعُ المواد تقريباً خاصيّةَ **المغنطة المغايرة،** ويعني ذلك أنّ الذرات (أو الجزيئات) قد لا تكون مغانطَ بحدّ ذاتها، ولكنها تغدو كذلك فتتراصف وتنتظم إذا ما طُبّقَ عليها حقل مغناطيسي خارجي قوي بشكلٍ كافٍ. في العادة تكون آثارُ المغنطة المغايرة والمغنطة المسايرة صغيرةً جداً، بحيث تختفي بمجرّد إزالة الحقل المغناطيسي الخارجي.

عندما يتمّ تسخينُ المواد ذات المغنطة الحديدية إلى أعلى من درجة حرارة معيّنة تُعرف باسم **درجة حرارة كوري** أو **نقطة كوري** ـ نسبةً إلى فيزيائية القرن التاسع عشر الفرنسية الشهيرة ماري كوري (Marie Curie) ـ فإنها تفقد تماماً تراصفَها وانتظامَها المغناطيسيَّين. لا تعود نطاقات المغنطة ضمن المغناطيس إلى الظهور والتشكّل إلاّ عندما تبرد المادة وتنخفض درجة حرارتها عن نقطة كوري، ويُدعى هذا الوضع بـ**تحوّل طَوْري.** عند درجات الحرارة العالية مع وجودِ الإشعاع الحراري وحدوثِ كثيرٍ من الاهتزازات، تفقد التفاعلات

المغناطيسية الدقيقة بين الذرّات المجاورة أهميتَها، ولا تعرف المادةُ عندها من قواعد تحكمها إلاّ ما ينجم عن التناظر: يُصرّ التناظر الدوراني للعالَم على عدمِ وجودِ اتجاهٍ مفضَّلٍ في الفضاء يُشير نحوه المغناطيس، وبالتالي يتلاشى الحقل المغناطيسي في تلك الحالة. لقد عاد التناظرُ الدوراني في قطعة المغناطيس عند درجات الحرارة العالية.

الكسر التلقائي للتناظر في الطبيعة

تقدّم المغنطةُ الحديدية شكلاً تمثيلياً ظاهرة نموذجية من ظواهر الكسر التلقائي للتناظر في الفيزياء. عند درجات الحرارة العالية تشير التدويماتُ (السبينات) الذرية إلى اتجاهات عشوائية في المكان، فتكون المنظومة متناظرة دورانياً بشكلٍ إحصائي. عندما تتمغنط المادةُ في درجات الحرارة المنخفضة، فإنّ التدويمات (السبينات) تغدو متراصفةً ومتوازيةً وفق أيّ اتجاه من بين عدد لانهائي من الاتجاهات الممكنة. في الواقع تصبح التدويمات (السبينات) ضمن نطاقات المغنطة متراصفةً ـ وبالتالي مُصطفِيَةً اتجاهاً معيَّناً ـ بشكلٍ تلقائي، كحال القلم الساقط كيفياً وفقاً لاتجاه ما. يبدو أنّ تناظرَ اللاتغيّر الدوراني الصالحَ عند درجات الحرارة العالية، قد كُسر في هذه المنظومة الفيزيائية التي يظهر أنها تعرف الآن اتجاهاً مفضَّلاً ومميّزاً في المكان. ولكنّ هذا الأمرَ يحدث بالصدفة البحتة، فهو اختيارٌ عشوائي لاتجاهٍ ما في الفضاء أخذه في البدء زوجٌ ذرّيٌ منفرد ثم تمّ تضخيمُه مع استمرار المنظومة بالتبرّد، ممّا قاد إلى آثارٍ كبيرة عيانية أمكنت رؤيتُها عند درجات الحرارة المنخفضة.

إنّ كسرَ التناظر التلقائي ظاهرة عامة منتشرة في الطبيعة، فهي تحدث دوماً تقريباً ـ في المنظومات الفيزيائية ـ لأنّ طاقةَ التشكيلةِ

المتناظرةِ للمنظومة أعلى من طاقةِ أيٍّ من التشكيلات غير المتناظرة، ففي حالة القلم تكون طاقته أعلى ما يمكن عندما يكون مرتكزاً على رأسه الرصاصي؛ وتوافق هذه التشكيلة عدمَ وجود قوةٍ ثقالية صافية تؤثّر على القلم من أجل إمالته وإسقاطه. ومع ذلك يكون وَضْعُ هذه التشكيلة غيرَ مستقر؛ إذ إنّ أيَّ تعكيرٍ وتشويشٍ ـ مهما كانا خفيفَي الحدّة ـ يكفيان لجعل القلم يميل عن وضعه، ثم تبدأ الثقالة بجرّه أبعدَ فأبعد عن وضع توازنه القلق ذاك. يبدأ القلم بالسقوط وفقاً لاتجاهٍ ما اعتباطي، وخلال ذلك تنقص طاقته الكامنة الثقالية. وبشكل مشابه إذا **شوّشنا وبثثنا الفوضى** بين مختلف الذرات في أرجاء قطعة المغناطيس الحديدي ـ ويعني ذلك أننا وجّهنا عشوائياً جميعَ التدويمات (السبينات) في مختلف الاتجاهات ـ فإننا بذلك نكون قد رفعنا من قيمة طاقة المنظومة. عندما تصبح المنظومة حارة جداً، فإنّ طاقتَها تصبح مرتفعةً، وبالتالي تغدو مرة أخرى متناظرةً تماماً، فتختفي المغنطة. عند درجات الحرارة المنخفضة، تُنقِص المنظومةُ من طاقتها الكلية عبر جعلها لتدويماتِ المغانط المجهرية تتراصف وتصطفّ في الاتجاه نفسه. يبدأ هذا الانتظامُ والاصطفافُ في النطاقات الصغيرة، ولكنّ النطاقات المنفردة لا تصير متراصفةً إلاّ عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي قوي. يشبه الوضعُ هنا ما يحدث عندما نسوّي السجّادةَ المجعّدة لجعلها ملساء، حيث تنتهي قطعة المغناطيس الحديدي في التشكيلة الموافقة فعلاً لأخفض طاقة.

في الحقيقة تتمثّل غالبيةُ المواد بتشكيلاتِ عشوائية ومشوَّشة للذرّات عند درجات الحرارة العالية حينما تكون في طورها الغازي أو السائل. عندما تبرد الموادُ وتغدو جامدة، فإنها غالباً ما تشكّل أجساماً صلبةً ذاتَ شبكاتٍ بلّورية هي عبارة عن مصفوفاتٍ منتظمة ودورية للذرّات. يشكّل كلور الصوديوم (وهو ملح الطعام المألوف)

شبكةً مكعبة بالغة الانتظام، وينعكس ذلك في الشكل البلوري لقطع الملح عندما نتفحّصها بالمجهر. يمكن غالباً فصم أو قطع البلوّرات ـ مثل بلّورات الماس والكوارتز ـ بطريقةٍ تفصل تماماً بين مستويَين متجاورَين من الذرات، ممّا يُحدث في أغلب الأحيان جلاءً ووضوحاً ضوئيَّين مذهلَين. إنّ الجليد العادي ـ الحالة الصلبة للماء ـ هو أيضاً بلوّرة. تختار الحالةُ البلّورية للمادة ـ عندما تتكاثف من الحالة الغازية أو السائلة إلى الحالة الصلبة ـ تلقائياً الاتجاهاتِ في الفضاء التي ستعرّف المستوياتِ والمحاورَ الخاصّة للبلّورة. إنّ التناظرَ الدوراني للبلّورة الصلبة هو تناظرٌ متقطّعٌ **أصغرُ** حقيقةً من المجموعة التي تشمل كامل الاتجاهات وهي ما يميّز الدورانات المستمرة في المكان التي كانت تعرّف تناظرَ المنظومة في الحالة السائلة أو الغازية عند درجات الحرارة الأعلى. وهكذا يكون التناظر الدوراني للمكان قد كُسرَ تلقائياً، ليغدوَ تناظراً أصغرَ هو ذلك الموافق للشبكة البلّورية.

نستطيع وصفَ ظاهرة كسر التناظر التلقائي لمنظوماتٍ مختلفة بدلالة المثال الشهير لـ «كمون القبّعة المكسيكية». لنتناول قبّعة مكسيكية عريضة (صمبريرة (Sombrero)) ونضعها فوق طاولةٍ مستوية. لهذه القبّعة شكلٌ أملس يبتدئ من قمةٍ تهبط نحو الحافة الدائرية العريضة، وعند أخفض منطقةٍ من هذه الحافّة هناك غورٌ دائري. لنتخيَّل الآن «كُلّة» رخامية متوازنة على ذروة القبّعة، فيكون لها في وضع التوازن هذا طاقة كامنة ثقالية كبيرة، وتكون قوة الثقالة الصافية المؤثّرة على الكلّة ـ عندما تكون في قمّة القبّعة تماماً ـ مساويةً للصفر. من الواضح أنّ الوضع هنا هو وضعُ توازنٍ قلق، إذ تكفي آثار اهتزازية ضئيلة ناجمة عن أيّ شيء بما في ذلك حركة الجزيئات الناجمة عن طاقتها الحرارية ـ أو حتى عن ميكانيك الكمّ ـ لِنَخْسِ «كُلّة» الرخام. عندما يحصل ذلك الأمر مهما كان سببه، تبدأ

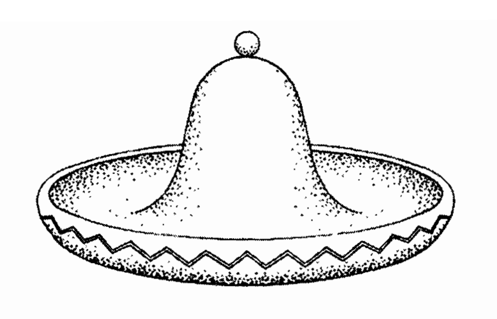
الرخامة بالسقوط نحو طرف القبّعة، لتستقرَّ أخيراً في الغور الطرفيّ حيث الطاقة الكامنة الثقالية أصغرية.

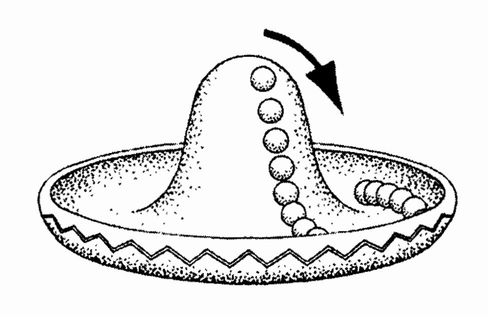
تبقى الطاقةُ مصونةً أثناء تدحرج «الكُلّة» الرخامية نحو غور القبّعة، ولكننا سنفترض أنّ غالبية الطاقة قد تبدّدت بأشكال ضياعٍ مألوفة. عندما تصل الكلّة إلى الغور فإنها تكون قد وجدت موضعَ استقرارٍ موافقاً لطاقة كامنة أصغرية يمكن أن تبقى فيه. يبيّن الشكل 21 هذا الأمر من أجل اتّجاه اعتباطي «اختارت» الرخامة أن تتدحرجَ وفقَه. في الحقيقة كان يمكن لـ «كُلّة» الرخام أن تُنهي رحلةَ تدحرجها في أيّ نقطةٍ من الغور الممثّل للكمون الأدنى، فجميع نقاطه لها الطاقة الكامنة **نفسها** لأنّ القبّعة الأصلية متناظرةٌ دورانياً حول محورها.

هناك نتيجةٌ لافتة للنظر عند كسر التناظر المستمرّ بشكل تلقائي. بما أنّ المنظومة اختارت اتجاهاً ما في المكان لاصطفاف وتراصف أجزائها ـ حيث إنّ «كُلّة» الرخام اختارت نقطةً من بين عدد لامتناهٍ من النقاط الواقعة في الغور الطرفيّ للقبّعة من أجل أن تستقرّ فيها ـ فإنّ تغييرَ هذا الاصطفافِ الإجمالي **لن يكلّفنا أيَّ طاقةٍ**. بعبارةٍ أخرى باستطاعتنا أن ندوِّر القبّعة (على سطح طاولةٍ صقيل لا احتكاكَ عليه البتّة) دون الحاجة إلى أيّ طاقة. وبشكلٍ مشابه يمكننا تدوير المغانط الذرية لمغناطيسٍ حديديّ من دون استهلاك أيّ طاقةٍ صافية، ويعني ذلك أننا نتخيّل إجراءَ التدوير بشكلٍ بطيءٍ جداً وبأناةٍ شديدة بحيث لا تُستهلَك طاقة حركية في أثناء الإجرائية، والمهم هنا هو أنّ تغيّر الطاقة الكامنة يكون معدوماً عند الانتقال من نقطةٍ لأخرى. وإذا عدنا مرةً أخرى إلى مثال القلم المنقلب وافترضنا أنه قد استلقى بعد وقوعه فعلاً على طاولةٍ ملساء عديمة الاحتكاك، فإنه في إمكاننا القيام بتدويره ببطء شديد. يمكن

عندها لذكاء الطفل الصغير أن يجعله ينتظر لغاية أن يشيرَ القلم إلى الفتاة الصغيرة التالية فيرقص معها، ثم يعيد الكرّة ـ متحلّياً بالصبر ـ مع كلّ فتاةٍ أخرى من خلال دوران القلم، ويمكنه تكرار هذه الإجرائية عدداً غيرَ محدود من المرّات بفرض أنّ جميعَ المشترِكات يتحلَّين بالصبر الكافي وإنهنّ موافقات على هذا الأمر.

عندما تصبح جميعُ تدويمات (سبينات) قطعة المغناطيس الحديدي مصطفّةً ومتراصفةً، يمكن حينئذٍ أن تحدث اهتزازات ـ أو ذبذبات ـ تتموّج عبرها مجموعةٌ كاملة من الذرّات المتراصفة ـ مثل تموّج الطحلب البحري عند مرور تيارات محيطية ـ وتُدعى با**لأمواج التدويمية (السبينية)**. تكمن النتيجةُ الأهمّ لكسر التناظر التلقائي في أنّ الموجة التدويمية (السبينية) ذات الطول الموجي الأعظمي توافق دوراناً لـ**مجمل المنظومة**. يعني ذلك أنه إذا دوّرنا المنظومةَ بشكلٍ غيرِ مستهلِكٍ للطاقة (نفرض المنظومةَ جاثمةً على سطحٍ أملسَ عديم الاحتكاك أو طافيةً تحوم لوحدها في الفضاء، وإنّنا نقوم بدورانٍ بطيءٍ متمهّلٍ إلى الدرجة التي نرغبها)، فإنّ حركةَ جميع التدويمات (السبينات) سويةً ستشبه حركةً تموّجيّةً لموجةٍ لامتناهية في الطول. وهذا يعني أنّ الموجةَ التدويمية (السبينية) الموافقةَ للطاقة الأخفض هي في الواقع موجةٌ معدومةُ الطاقة، وتوافق دوراناً منتظَماً لجميع الذرات التي تدوّر بذلك مجملَ الحقل المغناطيسي في المكان مع دورانها. يُعتبَر وجودُ هذه الموجة التدويمية (السبينية) ذات الطاقة المعدومة والطول الموجي الكبير ـ والمُسمّاة با**لنمط الصفري (العيّنة الصفرية)** ـ دلالةً أساسية على أنّ تناظراً ما قد كُسر تلقائياً في الطبيعة، وبذلك تكون مفتاحاً ـ دليلاً يبحث عنه الفيزيائيون ـ في وضعٍ ما ـ من أجل تحديد ما إذا كان هناك تناظرٌ مخفي عن العيان.





الشكل 21: «كمون القبّعة المكسيكيّة» (رسم شي فيريل).

التضخّم الكوني

كما ذكرنا سابقاً نعتقد أنّ الحجمَ الهائل للكون نفسه نجم على الأرجح من ظاهرةٍ مماثلة لكسر التناظر التلقائي. يكمن مفتاح اللغز هنا في اعتمادِ كسر التناظر التلقائي على فكرةِ كونِ الحالةِ الابتدائية المتناظرة للكون ـ مثلها في ذلك مثل حالة القلم المرتكز على رأسه المدبَّب ـ غيرَ مستقّرةٍ في الواقع، وبذلك تمتلك حالةُ التناظرِ الأعظمي طاقةً أعظمية. يمكن أن نعتبر المنظومة في الحالة التناظرية ـ بطريقةٍ ما ـ كأنها قنبلةٌ قلقة وغير مستقرة، حيث تكون جاهزةً لأن تنفجر وتتحوّل إلى حالةٍ غير متناظرة موافقةٍ لطاقةٍ كلّية أخفض بكثير.

لنتخيّل أنّ هناك حقلاً في الطبيعة يتغلغل وينتشر في مختلف أرجاء المكان، ندعوه بحقلِ «المضخِّم» (الإنفلاتون (Inflaton)). يمكن لهذا الحقل من حيث المبدأ ـ مثله في ذلك مثل الحقل الكهربائي أو المغناطيسي ـ أن يأخذَ أيَّ قيمةٍ فيزيائية في أيّ مكان وأيّ زمان. ومع ذلك نفترض أنه عندما يأخذ المضخِّم قيمةَ الصفر، فإنّ المحتوى الطاقي لحقل المضخِّم يكون كبيراً (مثل الطاقة الثقالية الكامنة «للكُلّة» الرخامية وهي مرتكزة بشكلٍ مُقَلقَل على قمة القبعة المكسيكية). يتجلّى ذلك المحتوى الطاقي الحقلي كطاقةٍ للفراغ نفسه، وطاقة الفراغ هذه تؤثّر على الثقالة فتجعل الكون يتمدّد ويزداد اتّساعاً. عندما تصير قيمة حقل المضخِّم غيرَ معدومة (وهذا ما يوافق في مثال القبعة المكسيكية توضّعَ «الكلّة» في غور القبّعة: أي «طور التناظر المنكسر»)، فإنّ طاقة الخلاء تصبح مساوية للصفر (أو تمسي قريبةً جداً منه، وهذا هو الوضع اليوم). يغدو معدّل تمدّد الكون واتّساعه إذاً أصغرَ بكثيرٍ أثناء طور الانكسار التلقائي، عندما يصبح حقل المضخِّم مثل «الكُلّة» الجاثمة في غور الحافة الطرفية لقبّعة الكمون المكسيكية. وهكذا ـ ضمن إطار نظرية التضخّم الكوني هذه ـ نكون قد افترضنا أنه عندما ابتدأ الكون كان حقلُ المضخِّم موجوداً عند قيمة الصفر (في أعلى القبّعة المكسيكية) مع مقدارٍ هائلٍ لطاقة الخلاء (وقيمةٍ سالبة ـ كما تُثبت الحسابات ـ لضغط الفراغ). يسبّب ضغطُ الفراغ وطاقتُه تمدّداً واتّساعاً سريعَين للكون، وينتهي هذا الانفجار التضخّمي عندما يستقرّ حقلُ المضخِّم في آخر الأمر عند غور قبّعة الكمون المكسيكية حيث تتلاشى طاقةُ الفراغ (وضغطُه): يُدعى كلُّ هذا بـ**التضخم**. لقد استحالت طاقةُ الخلاء وضغطُه إلى مكانٍ وزمانٍ تمَّ تضخّمهما.

قد يبدو كلُّ هذا من اختلاق مخيّلة فيزيائيٍّ نظريٍّ مجنون،

ولكننا نعرف الآن أنّ شيئاً من هذا القبيل لابدّ أن يكون قد حصل من أجل تحقيق كسر التناظر الملاحَظ للقوى في الطبيعة (خاصةً بين القوى الكهربائية والضعيفة)، وكان هو السبب المؤدي أيضاً إلى توليد كتل الجسيمات الأولّية. يُدعى هذا الشيء بـ «آلية هيغز» التي سنعود إليها لاحقاً وبالتفصيل في الفصل 12. إنّ التضخّم الكوني ـ الذي ابتكره منظر الجسيمات ألان غوث (Alan Guth) في أواخر السبعينيات ـ هو نسخة معدَّلة ومكيَّفة عن آلية هيغز، وهي تقدّم توصيفاً رياضياتياً عن الفيزياء الحقيقية (والمجهولة) التي سبّبت التمدّدَ الدرامي للكون واتّساعَه الهائلَ في بدايته.

في واقع الأمر يوجد كثيرٌ من الكيانات النظرية الممكنة القادرة على تزويد طاقةٍ كبيرة جداً (وضغطٍ سالبٍ) للفراغ أثناء الطور الموغل في القدم للكون. تستلزم نظريةُ التضخّم وجود فترة زمنية طويلة نوعاً ما يظلّ خلالَها حقلُ المضخِّم جاثماً في الطور «العالي» وغير المستقرّ (كحال القلم المرتكز على رأسه الرصاصي)، ممّا يشكّل تحدياً كبيراً أمام إنشاء نظرياتٍ واقعية تتضمَّنه. في الحقيقة لو انحدر حقل المضخِّم بشكلٍ سريعٍ نحو الأسفل إلى حالة الطاقة الأصغرية حيث تكون طاقة الفراغ فائقة الضآلة أو حتى صفراً، فإنّ التضخُّم الصافي للمكان سيكون صغيراً وبالتالي لن يكون كوننا إلاّ مجرّد خطأ ومشكلةٍ صغيرة مثل حركة فواق. بالمقابل يمكننا أن نتخيّل كارثةً موافقةً لأقلام رصاصٍ ترتكز على رؤوسها المثبّتة في أماكنها بالصمغ (وبالتالي فهي لن تقع أبداً)، إذ إنّ الأمرَ المشابهَ في حالة التضخّم الكوني هو أن يبقى حقلُ المضخِّم ملتصقاً بانخفاضٍ ضئيلٍ موجود عند قمّةِ قبّعة الكمون المكسيكية؛ مما يجعله لا يتدحرج أبداً إلى الأسفل نحو الغور. يقتضي مثلُ هذا الأمر كوناً لا يكفّ عن التضخّم، وبالتالي ستتمدّد وتتشعشع المادةُ كلّها ويخفّ

تركيزها حتى تتلاشى في النهاية إلى حالةٍ لاشيئية في مكانٍ خاوٍ وزمانٍ أبدي: ليست السرمديةُ دوماً أمراً جيّداً.

من اللافت للنظر أنّ هناك أدلة فلكية على حصول شيءٍ مماثلٍ للتضخّم في الماضي السحيق. لا يسمح التضخّم بتفسير سبب كِبَر الكون فحسب، ولكنه يفسّر كذلك سببَ تمتّعه الظاهري بالتناظرات الشمولية التي له على المقاييس الكبيرة والتي توافق عدم التغيّر الانسحابي والدوراني. في الواقع يبدو الكون نفسَه في جميع الاتجاهات وفي جميع الأمكنة، فنقول إنّ الكون **متجانسٌ ومتناظرٌ كروياً**. من الصعب تفسير كلّ هذه الأمور ضمن نموذج عن الانفجار العظيم للكون في غياب إجرائية التضخّم، حيث إنّه سرعان ما سيقودنا إلى كونٍ كثير الحفر والنتوءات وله مظاهر مختلفة تبعاً للاتجاهات في المكان.

يتنبّأ التضخّم ـ بشكلٍ لا لبس فيه ـ بأنّ الكثافة الطاقية الإجمالية للمادة المتبقّية في الكونِ اليومَ يجب أن تكون قريبةً جداً من قيمة دقيقة «حرجة» توافق كوناً لانهائياً تقريباً ـ أو مستوياً ـ من خلال معادلات إينشتاين. وهذا الأمر ينتج عن حقيقةِ أنّ تمدّدَ (اتّساع) الكون الانفجاري قاده إلى حالةٍ كبيرةٍ لامتناهية تقريباً في حجمها. وللأسباب نفسها يكون الكونُ ـ نتيجةً للتضخّم ـ متجانساً ومتناظراً كروياً كما تؤكّد على ذلك المراقبات والملاحظات التفصيلية لإشعاع الخلفية الكوني. وأخيراً تتطابق التراوحات (أي التفاوتات والذبذبات) الملحوظة في إشعاع الخلفية الكوني ذي الموجات المكروية ـ وهو الإشعاع المتبقّي من الطور الابتدائي الحارّ للانفجار العظيم ـ تماماً مع ما نتوقّعه لها اعتماداً على وجودِ آثارٍ من نوع التأرجح الكمومي في حقل المضخِّم خلال تدحرجه نحو الأسفل انطلاقاً من قمة قبّعة الكمون المكسيكية.

وهكذا يظهر أنّ ضخامةَ كوننا وسعتَه الهائلة مرتبطتان مع ظاهرة كسر التناظر التلقائي. وإنه فعلاً لأمرٌ لافتٌ للنظر أن نعلمَ أنّ مجملَ كوننا هو على ما يبدو ناجمٌ بشكلٍ عام عن حادثةٍ مماثلة لسقوط قلم أو برجٍ عال. لقد كان مصيرنا وفقاً لهذه الطريقة أن نغدو في حالةِ أنقاضٍ ذات تناظرٍ أقلّ بكثير ممّا كان موجوداً في البدء، وبالتالي أصبحت من الصعوبة بمكانٍ الآن إعادةُ كتابةِ سجل مستحاثات الفيزياء الأساسية خلال اللحظات الأولى من الخلق. يمثّل سبرُنا النهائي لفيزياء اللحظات الأولى من الزمن أقوى مسرّعات الجسيمات التي يمكننا تخيّلها وبناؤها، وبهذه الأدوات وحدها نستطيع أن نكشفَ عن التناظرات الأصيلة للطبيعة في حالتها النضرة وغير المنكسرة.

الفصل العاشر
ميكانيك الكمّ

نقيضُ عبارةٍ صحيحة هو عبارة خاطئة. ولكنّ نقيضَ حقيقةٍ عميقة يمكن أن يكون حقيقة عميقة أخرى

نيلز بوهر

يُعرَف فهمُنا المتراكم للعالَم الفيزيائي لغاية بدايات القرن العشرين بـ**الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية)**. تمّ اختبارُ هذه الفيزياء ـ المبنية أساساً على صياغة إسحق نيوتن ـ وبشكل متكرّر في آلاف التجارب التي أجريت خلال فترة مئتي سنة وبيّنت صحتَها. أُضيفت إلى قوانين نيوتن لاحقاً خلال القرن التاسع عشر قوانينُ الكهرباء والمغناطيسية التي تمّ وضعها وإثباتها خلال عدة عقود، وأمكن إيجازها بشكلٍ جميل من خلال الصياغة الرياضياتية لجيمس كلارك ماكسويل.

مع ذلك لم تتلاءم المعطياتُ التجريبية عن المحتوى الطاقي للضوء ولا فكرةُ الذرّة مع الصورة التقليدية (الكلاسيكية)، وبدأ عددٌ كبير من الأسئلة يتراكم شيئاً فشيئاً. أثار لونُ الضوء الذي تُشعّه قطعةُ حديد حارّة غيظَ الفيزيائي الألماني ماكس بلانك (Max Planck) حوالي عام 1900، إذ يتوهّج الحديد بلونٍ أحمر عند درجات الحرارة

المعتدلة، بينما يغدو لونه أزرق ـ أبيض عندما نسخنّه إلى درجاتٍ أعلى. هذا مع أنّ حسابات بلانك التفصيلية والمبنية على فيزياء نيوتن ـ ماكسويل تنبّأت بأنّ لونَ وهجِ الحديد يجب أن يكون دوماً أزرق بغضّ النظر عن درجة الحرارة، فهو أزرق باهت عند درجات الحرارة المنخفضة وأزرق ساطع عند درجات الحرارة الأعلى. أدرك بلانك وجودَ مشكلة جدّية في النظرية الماكسويلية عن الضوء، فهي لا تعطي نتيجةً صحيحةً بخصوص المحتوى الطاقي لحزمةٍ ضوئية. أطلق حلُّ هذه المسألة الثورةَ التي قادت إلى فيزياء جديدة ندعوها **بميكانيك الكمّ**.

تمّ تطوير ميكانيكِ الكمّ خلال فترةٍ امتدت لثلاثين عاماً ـ من سنة 1900 تقريباً ولغاية ثلاثينيات القرن الماضي ـ حقّقت عند نهايتِها النظريةُ الجديدة نجاحاً باهراً، وأعادت تعريفَ طريقةِ تفكيرِنا عن العالَم الفيزيائي. ولم يكن ذلك مجرّد تمرينٍ نظري أكاديمي حول الفلسفةِ الوجودية، لأنّ ميكانيكَ الكمّ ـ مع الإدراك العميق الذي يجلبه عن مفاهيم الإلكترون والذرة والضوء ـ يُعتبَر مسؤولاً فعلياً عن جزءٍ كبيرٍ من الناتج المحلّي الإجمالي في الولايات المتحدة، وهو أساسُ جميعِ قوانينِ الفيزياء المعروفة والمفتاحُ الرئيسي لفكّ الألغاز العميقة عن المادة والكون.

تظهر آثارُ ميكانيك الكمّ في المنظومات الفيزيائية **بالغة الصغر**، وما نعنيه بتعبير (**المنظومة الصغيرة**) هو تكوُّنُها من أشياءٍ صغيرةٍ جداً تمتلك قياساتها مقاديرَ ضئيلةً إلى أبعد حدّ من الطاقة وتتمّ حركاتُها خلال فترات زمنية فائقة القِصَر. تظهر الآثارُ الكمومية بشكلٍ درامي عندما نصل لمقاييس طولية من رتبة سعة الذرّة، أي حوالي جزء من عشرة آلاف مليون (10^{-10}) جزء من المتر. وفي واقع الأمر نستطيع القول ببساطة بأنه لا يمكننا فهم الذرة من دون ميكانيك الكمّ.

لا يعني هذا أنّ الطبيعة «توقف وتطفئ» فجأةً الميكانيك التقليدي ثم «تشغِّل وتشعل» ميكانيكَ الكمّ عندما ندخل العالَم دون المجهري هذا، فميكانيك الكمّ صالحٌ دوماً ويبقى صحيحاً على جميع المقاييس في الطبيعة، لكنّ الآثار الكمومية بالأحرى تصبح جليّةً وواضحةً بشكلٍ تدريجي عندما ننزل في مقاييسنا إلى عالَم الذرّات. يمثّلُ ميكانيكُ الكمّ المجموعةَ الأساسية والنهائية ـ على حدّ علمنا ـ للقواعد التي تحكم عملَ الطبيعة، ورغم ذلك فهو غريبٌ جداً ومختلفٌ بشكل كبير عمّا نألفه. لقد قيل إنه لا يوجد فردٌ واحدٌ من كلّ الناس «يفهم» فعلاً ميكانيكَ الكمّ، وما فعله العلماء ببساطة هو مجرّد الاعتياد على استعمال قواعده الغريبة تلك.

نحاول أحياناً وصفَ الآثار الكمومية بالطريقة التالية: **في العالَم العياني** ـ حيث يوجد الكثير من الذرّات المكوِّنة للأجسام الكبيرة (مثل الكواكب والطائرات) وللكائنات المتحرّكة ببطء (مثل الفِيَلة) ـ تكون الآثار الكمومية تقريباً غيرَ قابلةٍ للإدراك من قبل حواسّنا، وتظهر التوصيفاتُ التقليدية المشتقّة من قوانين نيوتن كنوعٍ من عملية «إيجاد المعدَّل الوسطيّ». لنتناول ـ كمثالٍ على سبيل الاستعارة ـ إحصاءَ استطلاعياً وطنياً يبيّن أنّ المعدّل الوسطيّ لعدد أطفال العائلة في الولايات المتحدة الأميركية هو 2,27 طفل، وأنّ قيمةَ نتيجة هذا الاستطلاع دقيقةٌ بخطأٍ إحصائي ـ لنقل ـ 0.01+ . يوافق هذا الوضعُ منظومةً موصوفةً بقوانين الفيزياء التقليدية، حيث تتنبّأ معادلات نيوتن بأنّ معدّلَ عدد الأطفال في العائلة يمكن أن يأخذ أيَّ قيمة لـ**عددٍ مستمرّ**، وقد بيَّنت التجربة أنّ هذا العدد هو 0.01+2.27. مع ذلك وعلى مستوى العائلات المنفردة ـ أي المستوى «المجهري» ـ **لا توجد عائلاتٌ** تحتوي 2,27 طفلاً! (لم تُفاجأ بهذا، أليس كذلك؟). إنّ عددَ أعضاءِ العائلات هو في الحقيقة **مكمَّم** وله قيمة **متقطّعة** لعدد

الأطفال: 0 أو 1 أو 2 أو 3 وهكذا، والقيمة **الوسطية** عند أخذ **المعدّل** على مستوى عددٍ كبيرٍ من العائلات هي وحدها التي تعطي النتيجةَ «التقليدية» الموافقة لعددٍ غير صحيح 2,27.

بشكل عامّ، كلّما كبرت المنظومةُ الفيزيائية بدتَ في سلوكها أقربَ إلى السلوك الوسطي لمكوّناتها، وبالتالي غدت أكثرَ تقليديةً (كلاسيكية). ومع ذلك يعجز هذا المثالُ البسيط عن الاستحواذ على كنه ميكانيك الكمّ وجوهره، فآثارُ ميكانيك الكمّ - كما نأمل أن نبيِّنَها لكم - أكثرُ إبهاماً وشبحيةً من مجرّد عملية أخذِ وسطيّ إحصائي.

تتجلّى آثارُ ميكانيك الكمّ أحياناً بشكلٍ درامي في منظوماتٍ عيانية وعند مقاييس مسافات ليست صغيرة بل قد تكون بالغة الكبر. تُمثّل ظواهرُ النجومِ النترونية وانفجاراتِ السوبرنوفا ومجموعاتِ أدوات العُدّة المنزليةَ الحديثة التي تستخدم ضوء الليزر (مثلاً قارئات الأقراص المدمجة (CD) وأقراص الفيديو الرقمية (DVD) بالإضافة إلى ظاهرة الناقلية الفائقة (مرور التيار الكهربائي من دون أيّ مقاومة) كلُّها آثاراً مباشرةً لميكانيك الكمّ. استناداً إلى ذلك تُعتبَر الكيمياءُ - وبالتالي البيولوجيا أيضاً - منحوتةً بواسطة ميكانيك الكمّ، إذ إنّ بنيةَ المادة وتوزيعَها في مختلف أرجاء الكون هما - على ما يبدو - نتيجتان لميكانيك الكم. نحن إذاً نعيش في عالَمٍ يحكمه تماماً ميكانيك الكمّ.

هل الضوء موجةٌ أم جسيم؟

تجادلَ العلماء طويلاً - ربّما ابتداءً من المناقشات العنيفة بين إسحق نيوتن وروبرت هوك - حول موضوع طبيعة الضوء وعمّا إذا كان **موجةً** أم **مجموعةَ جسيمات**. الضوء عموماً يتحرّك بخطوطٍ مستقيمةٍ ويعطي ظلالاً كأنه يتوقّف عندما يصطدم

بالأجسام المختلفة، وهذا يتوافق مع ما نتوقّعه لو كان الضوء حزمةً من كريّاتٍ صغيرة.

ومع ذلك فالضوء يعاني أيضاً ظاهرتَي **التداخل والانعراج** ـ مولِّداً عيّناتٍ وأنماطاً تتماشى مع طبيعة موجية ـ عندما يحاول المرور من شقّ ضيّق أو عبر حافّة حادّة. إذ يُعَدّ وجودُ الأنماط والعيّنات الخاصة بالظاهرتين السابقتين علامةً مميِّزةً للموجة ـ مثل موجة الماء ـ عندما تمرّ بالقرب من جسم يسبّب تشويشاً للسطح. وبالنتيجة بقي السؤالُ قائماً حتى بداية القرنَ العشرين: هل الضوء جسيمٌ أو موجة؟

تعلّمنا من جيمس كلارك ماكسويل في القرن التاسع عشر ومن نظريته عن الكهرمغناطيسية أنّ الضوءَ موجةٌ متحرّكة لحقول كهربائية ومغناطيسية، وبالتالي اعتقد كثيرٌ من الفيزيائيين أنه قد تمّ حلُّ الأحجية وأنّ الضوء ـ من دون أيّ شكّ ـ موجةٌ تتحرّك بسرعة الضوء c حاملةً الطاقة من **منبع** الضوء إلى **المستلِم أو المُستقبِل**. أثبتت النظريةُ أنّ الضوءَ يتمّ إصداره من شحناتٍ كهربائية متسارِعة، بينما يتمّ امتصاصه ليسبّبَ تسارعَ جسيماتٍ مشحونةٍ بعيدة. وتمّ اختبارُ هذه الأمور تجريبياً ومن ثَمَّ التحقّقُ من صحّتها، حتى إنّ إرسالاتِ البثِّ الراديوي الأولى تمّ بناؤها في أواخر القرن التاسع عشر اعتماداً على هذه النظرية الناجحة. يمكن لمنبع الضوء أن يكون أيّ شيءٍ يرجّ ـ أي يهزّ ـ أو يصدم الإلكترونات مسبِّباً بذلك تسارعَها.

نستطيع أن نفهم ظاهرةَ الضوء من خلال مثال نار المخيّم. تكون الإلكترونات ضمن الذرّات الساخنة لنار المخيّم «مُثارةً حرارياً»، فتتصادم في ما بينها ومع ضوء نار المخيّم نفسه مُصدِرةً ومُمتَصّةً لموجاتٍ ضوئية عند تسارعها الناجم عن ارتداداتها في هذه التصادمات. ينتشر الضوء بعيداً عن منبعه، ويلِج قسمٌ منه في آخر الأمر مُقْلَةَ العين حيث يصدم ويهزّ الشحناتِ الكهربائيةَ في الخلايا

المستقبِلة ضمن شبكية العين. يتمّ في تلك الخلايا امتصاصُ موجة الضوء التي تُوْدِع طاقتَها هناك، وبفضل اهتزاز الإلكترونات تبدأ سلسلةُ تفاعلاتٍ كيميائية تصدر عنها سيّالة عصبية تنتقل إلى منظومة الرؤية في الدماغ. وندخل الآن عالَم الوعي والإدراك فنلاحظ المشهدَ الهادئ لنار المخيّم في ليلةِ صيفٍ باردةٍ.

إنّ موجاتِ المذياع هي أيضاً شكلٌ من أشكال الضوء، لكنها تقعُ خارجَ نطاق ومدى حساسية عيوننا وبالتالي فهي غير مرئية. في الحقيقة إنّ الهوائيَّ الذي يبثّ موجةً راديوية هو عبارةٌ عن سلك طويل يُخلَق فيه تيّار كهربائي متناوب (إلكترونات متسارعة) فيُصدر موجة الراديو. وبالمقابل يمتلك المُستقبِلُ بدوره هوائياً تسبِّب موجةُ الراديو الواردةُ تسارعاً للإلكترونات فيه، ممّا يُنتج تياراً كهربائياً يمكن تضخيمه عبر داراتٍ كهربائية خاصّة بالمُستقبِل لتُنتِج أغنيةً هادئة لنورا جونز(*) (Norah Jones) أو سيمفونيةً روحانية لغوريسكي(**). لا نزال نستخدم نظريةَ ماكسويل إلى أيامنا هذه من أجل تصميم الهوائيات، بل إنّ هذه النظرية شكّلت حصرياً أساسَ تصميم غالبية الأجهزة الإلكترونية لغاية منتصف القرن العشرين.

ما هي الموجة؟ لنأخذ بعين الاعتبار موجةً طويلةً وهي تنتشر خلال تجوالها وحركتها في الفضاء. تُدعى الموجة المنتشرة أثناء عبورها للفضاء أحياناً باسم **القطار الموجي** حيث تكون فيه ذُرى وأغوارٌ متتاليةٌ عديدة. توصَف مثل هذه الموجة من خلال ثلاثة مقادير: **التواتر وطول الموجة والسعة.** يمثّل طول الموجة المسافةَ بين ذروتَين متتالِيتَين (أو بين غورَين متتالِيَين) للقطار الموجي، أمّا التواتر

(*) موسيقية ـ مغنّية معاصِرة من الولايات المتّحدة ذات أصول أميركية ـ هندية.

(**) موسيقي كلاسيكي معاصر من بولونيا.

فهو عدد المرات التي تصل فيها الموجةُ ـ في نقطةٍ ثابتةٍ من المكان ـ إلى ذروتها (أو غورها) خلال ثانية واحدة أثناء إتمامها لدوراتها الزمنية الكاملة.

إذا فكّرنا بالموجة على أنها قطار شحن بضائعٍ طويل، فيكون طول الموجة هو طول أيّ من عرباته، أمّا تواتر الموجة فيكون عددَ العربات التي تمرّ خلال ثانية واحدة أمامَنا ونحن ننتظر بفارغ الصبر مرور القطار كلّه. تساوي سرعة الموجة المنتشرة في هذه الحالة إذاً حاصلَ قسمة طول عربة القطار على الزمن الذي تستغرقه للمرور أمامنا، أو ـ بعبارة رياضياتية ـ تساوي سرعة الموجة حاصل جداء الطول الموجي بالتواتر. وهكذا نجد ـ من خلال معرفتنا للسرعة ـ أنّ الطول الموجي والتواتر **مرتبطان ارتباطاً عكسياً**؛ ونعني بذلك أنّ الطول الموجي يساوي حاصل قسمة سرعة الموجة على تواترها بينما يساوي التواتر حاصل قسمة سرعة الموجة على الطول الموجي.

أمّا **سعة** الموجة فهي ارتفاع الذرى (أو انخفاض الأغوار) مقاساً ابتداءً من القيمة المتوسّطة. يعني ذلك أنّ المسافةَ الفاصلةَ بين قمة الذروة وقعر الغور تساوي ضعفَي سعة الموجة، ويمكن التفكير بها على أنها ارتفاع أيّ من عربات قطار شحن البضائع. تمثّل السعةُ من أجل موجة كهرمغناطيسية تعبيراً عن قوّة الحقل الكهربائي في الموجة، أمّا بالنسبة إلى موجة الماء فإنّ مثلَي السعة هو المسافة التي يرتفع بها القارب من موضع الغور إلى موضع الذروة عندما تمرّ به الموجة. وفي كل الأحوال فإنّ الشكل 22 أبلغ من أيّ كلام[1].

---

(1) إذا مثّل χ الموضعَ على محورٍ موازٍ لاتّجاه حركة الموجة وكان t الزمن، فإننا نستطيع وصفَ الموجة المائية المتحرّكة عبر تابع جيبي من الشكل $\psi (\bar{\chi},t) = A \cos (kx - \omega t)$. إذا رسمنا التابعَ في لحظةٍ زمنية t نختارها كيفياً فإننا نحصل على **القطار الموجي** (تابع لـ χ)، وعندما يزداد الزمن t يتحرّك هذا القطار نحو اليمين. تُدعى الكمية k بـ**العدد الموجي**، أمّا ω =

تمّ ـ ضمن نظرية ماكسويل عن الكهرمغناطيسية في القرن التاسع عشر ـ إدراكُ أنّ **لونَ** الضوء المرئي يتحدّد بطول الموجة (أو مقدار التواتر، حيث أنّ هناك علاقة عكسية بينهما، فإذا افترضنا التواترَ صغيراً كان طول الموجة كبيراً والعكس بالعكس). إنّ الضوءَ المرئي الموافق لأكبر طول موجة هو الضوء الأحمر، بينما يوافق اللونُ الأزرق ضوءاً مرئيّاً ذا طولٍ موجي أصغر.

يبلغ طولُ موجة الضوء المرئي الأحمر حوالي $(6{,}5 \times 10^{-5}$ $= 0{,}000065)$ متر. كلّما ازداد طولُ موجة الضوء غدا اللون أكثرَ وأعمقَ احمراراً حتى يختفي ولا تعود أعيننا تتحسّسه عند طولِ موجةٍ مقاربٍ لـ $(7 \times 10^{-5} = 0{,}00007)$ متر. إذا كبّرنا الطولَ الموجي أكثر من ذلك، حصلنا على **الضوء تحت الأحمر** الذي نشعر به كحرارةٍ هادئة لكنْ دون أن نتمكّن من رؤيته بعيوننا. وإذا ما واصلنا زيادة الطولَ الموجي، فإننا سوف ندخل عالَم الموجات المكروية ثم ـ باستمرار تكبير أطوال الموجات ـ نحصل على الموجات الراديوية.

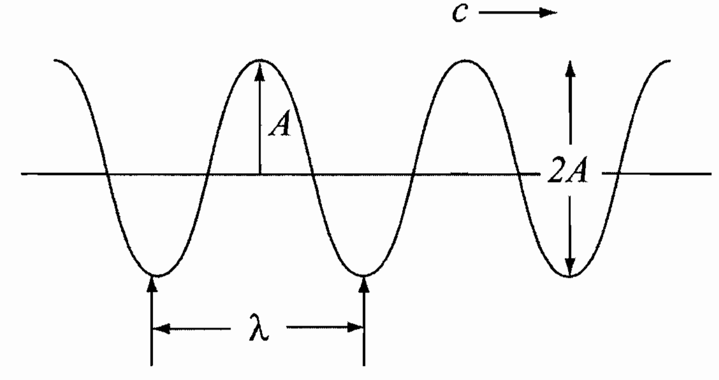
بالمقابل إذا جعلنا الطول الموجيّ أقصر من $(0{,}000045$ $= 4{,}5\times10^{-5})$ متر غدا الضوءُ أزرق اللون. يصبح الضوءُ عند الأطوال

= فتُدعى **التواتر الزاويّ** للموجة. ترتبط هاتان الكمّيتان بالمقدارَين المألوفَين **التواتر** $f = w / 2\pi$ (عدد الدورات في الثانية) وطول الموجة $\lambda = 2\pi/k$. إنّ طول الموجة (l) هو المسافة بين ذروتَين متتالِيتَين (أو بين غورَين متتالِيَين) للموجة، أمّا التواتر (f) فهو عدد المرات التي تصل فيها الموجةُ ـ في نقطةٍ ثابتةٍ من المكان ـ إلى ذروتها (أو غورها) خلال ثانية واحدة أثناء إتمامها لدوراتها الزمنية الكاملة. بعبارةٍ أخرى إذا فكّرتَ بالموجة على أنها قطار بضائع طويل يكون l هو طول عربة (فاركونة) القطار، بينما يكون f عددَ عربات القطار التي تمرّ أمامك خلال ثانية واحدة وأنت واقفٌ تنتظر مرور القطار بصبرٍ وأناة. تُدعى A **بسعة الموجة** وهي تعينّ ارتفاعَ الذرى؛ فالمسافة بين الذروة والغور تبلغ 2A. تبلغ سرعة الموجة المتحرّكة $c\ \lambda F = w/k$. تُكتَب عادة عبارة التابع الموجي باستخدام الأشعة، حيث يُستعاض عن $\vec{\kappa}.\vec{\chi}$ بـ ثلاثة أبعاد من المكان لتمثيل موجة تتحرّك في الاتّجاه $\vec{\kappa}$.

الموجية الأقصر (أي الموافقة لتواترات أعلى) ذا لونٍ أزرقَ بنفسجيٌ غامقٍ، ثم يختفي عن الرؤية مع تقصير الطول الموجي لأقلّ من ذلك عند حوالي الـ ($4 \times 10^{-5} = 0,00004$) متر. إذا واصلنا تقصير الطول الموجي، غدا الضوء **فوقَ بنفسجيّ** ثم أشعةً سينية، وفي نهايةً الأمر ـ عند أطوالِ موجية أقصر بكثير ـ يصبح الضوء أشعةَ غاما.

تتعلّق المشكلةُ الأساسية في النظرية التقليدية (الكلاسيكية) للضوء بالمحتوى الطاقي، إذ تنبأّت هذه النظرية باعتماد طاقة الموجة على **سعتها** لا غير، وهكذا تمّ التنبّؤ **باستقلال** طاقة الموجة الكهرمغناطيسية **عن طولها الموجي** أو عن لونها. سيكون للضوء الأحمر والأزرق اللذان لهما سعتان (أي شدّتان) متساويتان إذاً المحتوى الطاقيُّ نفسُه تماماً.

لا نحتاج للتأمّل في كتلةٍ من الحديد الحارّ لكي نرى المشكلة هنا. يثير ذلك المفهوم عن طاقة الموجة الكهرمغناطيسية مباشرةً مشاكلَ يمكننا ملاحظتها فوراً. على سبيل المثال، عندما تبرد الجمرات في نار مخيَّمنا فإنها تتوهّج بلونٍ أحمر. إنّ درجة حرارة الجمرات هي قياسٌ **للطاقة المتوسّطة** لجميع الأجزاء المجهرية للجمرات الحارة؛ وبالتالي يجب أن تكون قيمُ احتمالِ إثارةِ جميع حالات الحركة والاهتزازات للذرات والإلكترونات ـ التي لها تقريباً الطاقة نفسها (والمساوية لقيمة درجة الحرارة المعطاة) ـ متساوية. تستطيع إذاً نارٌ حارّة أن تُثيرَ وتخلق حالاتِ حركة بطاقات عالية، وبالتالي ستتحرّك الذرّات بطاقاتٍ حركية كبيرة، ممّا يؤدّي إلى أنها سوف تُشعّ موجات ضوئية بطاقاتٍ عالية. من ناحية أخرى، لا يمكن أن تُثارَ في كتلةِ جليدٍ بدرجةِ حرارةٍ منخفضة إلاّ حالاتُ حركةٍ واهتزازاتٌ ذرّيّة بطاقاتٍ منخفضةٍ جداً، وبالتالي لا يمكن لكتلة الجليد أن تُشعّ إلاّ مقاديرَ صغيرة من الضوء ذي الطاقة المنخفضة جداً.



الشكل 22: قطار موجي أو موجة منتشرة. تنتشر الموجة إلى اليمين بسرعة c ويبلغ طولها الموجي λ (أي طول دورة كاملة بين ذروتَين متتاليتَين أو غورَين متتاليَين). يرى المراقبُ الساكن الذي يشاهد الموجةَ تمرّ من أمامه تواتراً لمرور ذرى (أو أغوار) قيمته c/λ، أما سعة الموجة فهي ارتفاعُ ذروتها عن قيمتها المتوسّطة (أي عن معدّلها الوسطي).

ولكن ما هو السبب إذاً في عدم صدور الضوء الأزرق من جمرات نار المخيَّم الآخذة بالتبرّد؟ وفقاً للنظرية التقليدية في الكهرمغناطيسية يجب أن يمتلك الضوء الأزرق - في آخر الأمر - الطاقةَ نفسها التي يمتلكها الضوء الأحمر. وفي الواقع الفعلي عندما تبرد الجمرات فإنّ توهّجَها يضعف أكثر فأكثر، ويغدو تدريجياً أكثرَ احمراراً، ليختفي في النهاية ضمن غياهب الضوء تحت الأحمر الساخن وغير المرئي، فلو كانت النظرية التقليدية صحيحةً لأصدرت الجمرات الآخذة بالانطفاء ضوءاً أزرق **بالمقدار نفسه** الذي تصدره من الضوء الأحمر، وذلك عند درجات الحرارة كلِّها (وكانت ستصدر أيضاً كثيراً من الأشعة السينية وأشعة غاما!). عندما أجرى ماكس بلانك حساباته وجد أنّ الجمرات الخامدة يجب حقيقةً أن تظهر متوهّجةً بلون أزرق، ويعود السبب التقني لذلك في أنّ عدداً أكبرَ من

الموجات زرقاء اللون ذات الأطوال الموجية القصيرة يمكن حصره ضمن الحيّز المكاني المحيط بالجمرات الحارّة مقارنةً مع عدد الموجات حمراء اللون ذات الطول الموجي الكبير، بينما كان الواقع يقول بعكس ذلك. ومن هنا فكَّر بلانك ـ وكان على حقّ في تفكيره ـ بوجود غلطٍ ما في النظرية التقليدية للكهرمغناطيسية[2].

قدّم بلانك علاجاً جذرياً لهذه الأحجية، فقد اقترح بأنّ الضوء يحتوي على عناصر مكوِّنة ـ أي جسيمات ـ تتحرّك نوعاً ما بطريقةٍ موجية. دُعيَت هذه العناصر الصغيرة لموجة الضوء بـ**الكمّات** أو **الفوتونات** كما نعرفها اليوم. عرض بلانك اقتراحَ امتلاكِ كلِّ فوتونٍ لطاقةٍ متناسبةٍ طرداً مع تواتر الموجة الضوئية وفقاً للمعادلة: $E = hf$ حيث E طاقة الفوتون وh ثابتٌ من ثوابت الطبيعة الأساسية وf التواتر، أمّا شدّة الضوء فهي مجرّدُ قياسٍ **للعدد الإجمالي للفوتونات** في الموجة الضوئية. يجب على أيّ موجة ضوئية أن تحتوي على عددٍ محدّد من الفوتونات، وبالتالي تكون طاقتها الإجمالية مساويةً لِـ: $E_{total} = Nhf$، أي إنّ الطاقة الكلية للموجة تساوي حاصلَ جداء عدد الفوتونات N بالثابت h بتواتر أيّ فوتون f.

كلّما ازدادت شدّةُ موجة الضوء كَثُر عددُ الفوتونات المتواجدة في الموجة، ولكنّ طاقةَ كلّ فوتون تعتمد الآن على **تواتره**، حيث تمتلك الفوتوناتُ زرقاء اللون تواتراً أعلى ـ وبالتالي طاقةً أكبر ـ من الفوتونات حمراء اللون. تسمح هذه الفرضيةُ بـ «تفسير» سببِ صعوبةِ

---

(2) كان الفيزيائيون ـ مثل ماكس بلانك ـ يفضّلون التكلّم عن «جسم أسود مثالي»، وهو تجويفٌ محاطٌ بجدار ساخن. يوضَع التجويف ضمن درجة حرارة معيّنة، ويتمّ النظر بشكلٍ حصري إلى الضوء الذي يحتويه التجويف أو يصدر من داخله. يُزيل هذا الأمر الارتيابات والشكوك المتعلّقة بالتركيب الكيميائي لجمرات نار المخيّم الآخذة بالانطفاء (في مثالنا).

إثارة وإصدارِ الضوء الأزرق في جمرات نار المخيَّم الخامدة مقارنةً مع الضوء الأحمر. يمكن للفوتونات الحمراء ذات الطاقات الأخفض أن تتمّ إثارتُها في درجات حرارةٍ منخفضة، بينما من الصعب إثارة الفوتونات الزرقاء ذات الطاقات الأكبر عند درجات الحرارة هذه.

في البدء اعتقد كثيرٌ من الناسِ أنّ فكرةَ بلانك تصحّ على الأوضاع الحرارية لا غير، ولكنّ المشاكلَ مع المحتوى الطاقي للضوء غدت لا تُطاق عند إجراء تجاربَ في مجالاتٍ أخرى، ومثّل **المفعولُ الكهرضوئي** أحدَ أهمّ هذه المجالات. لقد وجد الفيزيائيون أنّ باستطاعتهم بسهولة نزعَ الإلكترونات وجعلَها تغادر فجأةً بعض المعادن من خلال تسليطِ ضوءٍ عليها. غدا هذا الأمرُ أساسَ تصميم كاميرات الرائي (التلفاز) الحديثة وآلات التصوير الرقمية التي تحوّل الضوء إلى إشاراتٍ كهربائية. مع ذلك مثّلَ المفعولُ الكهرضوئي تحدّياً إضافياً للنظرية التقليدية (الكلاسيكية) للإشعاع الكهرمغناطيسي.

لقد ظهر أنّ الضوءَ الأحمر يعجز عن اقتلاع الإلكترونات من معدنٍ معيّن، بينما يستطيع الضوء الأزرق ذلك. في الحقيقة تبيَّن كذلك أنه كلّما كان الضوءُ مائلاً أكثر إلى الزرقة امتلكت الإلكترونات المقتلَعة طاقةً أكبر، في حين أنه لا مبرّر على الإطلاق لمثلِ هذا الاختلاف وفقاً للنظرية التقليدية التي تتضمَّن عدم اعتماد طاقة الضوء على الطول الموجي - أي اللون - الخاصّ بهذا الضوء. مهما بلغت درجةُ لمعانِ الضوء الأحمر الساقط على المعدن فإنه كان عاجزاً عن اقتلاع أي إلكتروناتٍ، بينما مع ضوء أزرق باهت تمّ اقتلاع بضعة إلكترونات من سطح المعدن، ومع ضوء أزرق ساطع أُنتزِعَت إلكترونات أكثر من المعدن.

أدرك إينشتاين في **سنته الأعجوبية** بإنجازاته هائلة الروعة خلالها (سنة 1905 العظيمة التي كتب فيها حوالي خمس ورقاتٍ علمية، كلٌّ

منها بمستوى يستحقّ نيل جائزة نوبل، بما فيها الورقة التي عرضت نظريتَه عن النسبية الخاصة) أنّ فكرة بلانك الجديدة تفسّر وبأناقة المفعول الكهرضوئي. تعاني الإلكترونات في المعدن حوادثَ صدم منفصلة مع الفوتونات المنفردة، فإذا لم يمتلك الفوتون المنفرد طاقةً كافية لنزع الإلكترون من المعدن، فعندها لن نرى أيَّ إلكتروناتٍ صادرة بغضّ النظر عن عدد الفوتونات المتواجدة. وهكذا حتى لو كان لدينا ضوء أحمر شديد البريق والسطوع (أي فوتونات كثيرة، ولكن طاقة كلّ منها منخفضة)، فيجب ألاّ نتوقّع مشاهدة أيّ إلكترونات مُنتزَعة.

من ناحية أخرى، إذا كان الضوءُ أزرقَ اللون (وبالتالي كانت طاقةُ الفوتون الواحد فيه كبيرةً)، فعندها يمكن لأيّ فوتون منفرد يصطدم بالإلكترون أن يقتلعَه من المعدن. عند وجود ضوءٍ أزرقَ اللون وباهتٍ يحتوي على عددٍ ضئيلٍ من الفوتونات، فإننا نرى عدداً قليلاً من الإلكترونات الصادرة. بينما نشاهد عدداً كبيراً منها عندما يكون الضوء الأزرق ساطعاً وشديداً يحتوي على عددٍ كبير من الفوتونات. يمكننا في الحقيقة إحصاءُ عدد الفوتونات من خلال عدّ الإلكترونات المُقتلَعة! لم يحز إينشتاين في النهاية على جائزة نوبل تقديراً لعمله في النسبية الخاصة أو النسبية العامة بل من أجل تفسيره للمفعول الكهرضوئي.

كما لاحظنا أعلاه ابتكر ماكس بلانك ـ من خلال تحليله لِلَون الضوء الصادر حرارياً ـ الثابتَ «السحريّ» الذي يعرِّف ويميّز ميكانيك الكمّ. يُدعى هذا الثابت بـ**ثابت بلانك** ويُرمز له بالحرف h[3]، وهو يخبرنا بمقدار الطاقة التي يمتلكها الفوتون من أجل تواترٍ معيّن. في

(3) هناك ميلٌ لاستخدام الكمية $\hbar = h/2\pi$ أكثر من الكمية h في الفيزياء، وعادةً نشير إلى كلا الكميتين h و$\hbar = h/2\pi$ باسم «ثابت لانك».

الحقيقة ربّما يكون صحيحاً أن نعتبر ثابت بلانك وسرعة الضوء أهمَّ ثابتَين فيزيائيَّين في الطبيعة ـ لغاية اليوم ـ معروفَين بالنسبة إلينا (يُعَدّ ثابتُ الثقالة لنيوتن على الدرجة نفسها من الأهمية بالنسبة إلى كثير من المنظرين). يعيِّن الثابتُ h الحدودَ التي نعبر عندها إلى ما نعنيه بكلمةِ «صغير» في الفيزياء، أي إلى مطلَعِ ومستهلّ عالَم السلوك والتصرّف الكموميَّين (تماماً كما تحدّد سرعةُ الضوء المجالَ الذي تُستبدل فيه آثارُ النسبية الخاصة بتلك التي لميكانيك نيوتن). إذا تضمّنت حركةُ منظومة فيزيائية طاقاتٍ ومقاييسَ زمنيةً (أو مقاييس مسافات واندفاعات) يُعطي جداؤها ببعضها قيمةً قابلةً للمقارنة مع h أو أصغر منها، فنحن حينئذٍ موجودون في **العالَم الكمومي**.

تبلغ قيمة h المُقاسة بدقة ($6,626068 \times 10^{-34}$) كيلوغرام ـ متر مربّع في الثانية. هذا عددٌ صغيرٌ جداً يميّز المقاييسَ الصغيرة للمسافات والأزمنة والطاقات أو الاندفاعات التي تعرّف العالَم الكمومي.

النظرية الكمومية تزداد غرابةً في أطوارها

هكذا أخذ جنينُ النظرية الكمومية بالتكوّن، وقد بدا أولاً أنها تخصّ فقط سلوكَ الضوء حيث كانت تتمثّل مفارقةُ ازدواجية المظهر (السلوك) الجسيمي ـ الموجي في أوضح صورها. ولكنْ تبيَّن أنّ هذه المفارقة كان من المُحتمَل أن تكون قد حدثت أيضاً في ظروفٍ وأوضاعَ أخرى تتضمّن سلوكاً «دورياً» ـ أو ذا تأرجح اهتزازي ـ شبيهاً بالأمواج.

نعرف الآن أنّ كلَّ شيءٍ يتكوّن من ذرّات، فحتى رمش البعوضة يمكن أن يحتوي على مليارات منها. وقد بدأت صورةٌ جديدة عن بنية الذرة بالتشكّل في أيام بلانك وإينشتاين حين تمّ نوعاً

ما فهمُ بعض مظاهر البنية الذرية عبر التجربة. لقد صار معروفاً من خلال سلسلة تجارب أساسية قام بها إرنست رذرفورد (Ernest Rutherford) من سنة 1906 ولغاية سنة 1911 في جامعة كامبردج (Cambridge) أنّ هناك قلباً قاسياً بالغَ الصغر داخل الذرة يُدعى **بالنواة** حيث يجثم حوالي 99,98 في المئة من كامل كتلة الذرة[4]. تمَّ إدراكُ أنّ للنواة شحنةً كهربائية موجبة كبيرة، وتمَّ كذلك إدراكُ أنّ الإلكترونات ـ المكتشَفة من قبل ج. ج. طومسون (J. J. Thomson) عام 1898 بشحناتٍ سالبة ـ تحوم بشكلٍ من الأشكال في مداراتٍ حول النواة. وشيئاً فشيئاً أخذت الصورة تتوضّح في أنّ الذرة كائنٌ شبيهٌ بالمنظومة الشمسية، حيث النواة ـ مثل الشمس ـ في المركز والإلكترونات تدور ـ مثل الكواكب ـ حولها. ولكن مرةً أخرى كانت هناك مشاكل نظرية عصيبة بزغت انطلاقاً من نظرية ماكسويل عن الكهرمغناطيسية والطاقة حين تطبيقها على تلك الصورة.

يجب على الإلكترونات عندما تتوضّع في مداراتها أن تخضعَ لتسارعٍ معيّن (في الحقيقة وجدنا أنّ جميع الحركات الدائرية هي حركاتٌ تمتلك تسارعاً)، لأنّ شعاعَ السرعة يتغيّر اتجاهُه بشكل مستمر مع مرور الزمن. ووفقاً لنظرية ماكسويل في الكهرمغناطيسية،

---

(4) كان رذرفورد (Rutherford) يوجّه جسيمات ألفا (وهي ما أُكتُشف لاحقاً بأنها عبارة عن نوى ذرّات الهليوم) التي كانت تُشعّها بعض المواد النشيطة إشعاعياً على رقاقات رفيعة من الذهب. تمثّلت الصورة التي كانت في مخيّلته بما يحدث عند قذف طلقات ضمن مائع كبيرٍ عديم الشكل من كريم أو معجون الحلاقة. كانت مفاجأةً لرذرفورد أنه لاحظ من حينٍ لآخر عودةَ بعض جسيمات ألفا المنطلقة منعكسةً إلى الوراء، كما لو كانت طلقاتٍ ترتدّ إلى الخلف راجعةً من كتلة معجون الحلاقة، وهذا يشير بقوّة إلى وجود شيءٍ ما مختبئ في الداخل. وجد رذرفورد أنّ نمطَ تبعثر جسيمات ألفا مطابقٌ تماماً لما نتوقّعه في حالة وجود مكوّنات ماديّة صغيرة وصلبة متوضّعة في مراكز الذرّات وذات شحناتٍ موجبة كهربائياً. وهكذا ومن خلال هذه الطريقة اكتشف رذرفورد النواة الذرّيّة.

يجب على الشحنات المتسارعة أن تُصدر إشعاعاً كهرمغناطيسياً أي ضوءاً. بيّنت التقديراتُ أنّ **مجمل الطاقة المدارية للإلكترون** سوف يتمّ إشعاعُهاً آنياً إلى الخارج على شكل موجات كهرمغناطيسية، وبالتالي ـ تبعاً لنظرية ماكسويل ـ سوف تنهار مداراتُ الإلكترونات وحتى الذرة نفسها، وهذه الذرات المنهارة ستكون خامدةً كيميائياً وعديمة الفائدة. مرةً أخرى بدا أنّ كلّ ما تطرحه النظرية التقليدية (الكلاسيكية) ـ في ما يتعلّق بطاقة الإلكترونات والذرّات أو النوى ـ هو غير معقول.

علاوةً على ذلك كان العلماء في القرن التاسع عشر يعرفون أنّ الذرّات تُشِعّ الضوءَ ضمن خطوطٍ طيفية متمايزة موافقةٍ لألوان محددّة تماماً، أي إنّ ذلك كان يتمّ بشكل موافق لقيم متقطّعة منفصلة (**مكمَّمة**) للطول الموجي (أو التواتر). بدا الأمرُ كما لو كانت هناك مدارات إلكترونية خاصّة ومحدَّدة في الذرة، يثبُ الإلكترون جيئةً وذهاباً بينها عندما يُصدر الضوء أو عندما يمتصّه. كانت الصورة الكبلرية للمدارات تتنبّأ بطيفٍ مستمرٍ للضوء المُشَعّ، وذلك بسبب وجود مجموعةٍ مستمرّة من المدارات الكبلرية الممكنة. بدا إذاً عالَم الذرة كما لو كان «رقمياً» متقطّعاً، بشكل يخالف عالَم الفيزياء النيوتنية حيث تكون التغيّرات ذات صفة استمرارية.

كان نيلز بوهر في عام 1911 باحثاً شابّاً يعمل مع إرنست رذرفورد في جامعة كامبردج، وكان يؤمن بأنّ النظرية الكمومية سوف تنقذ الذرة مثلما فعلت مع المفعول الكهرضوئي ومع لون الحديد الحارّ. تمثّلت فكرةُ بوهر في أنّ مداراتِ الإلكترونات كانت فعلاً مماثلةً لمدارات جسيماتٍ تشبه الكواكب الدائرة حول الشمس، ولكنها في الوقت نفسه وبشكلٍ يدعو للاستغراب والمفارقة كانت تشبه الأمواج أيضاً. كيف يمكن إذاً تطبيقُ مفاهيمِ النظرية الكمومية

الحديثة؟ ركّز بوهر اهتمامَه على أبسط الذرات، وهي ذرة الهيدروجين التي تحتوي على إلكترون واحد يدور حول بروتونٍ منفرد يمثّل النواة.

أدرك بوهر في سنة 1911 أنه لو كانت حركةُ الإلكترون مثل حركة موجة، فإنّ المسافة التي يقطعها خلال دورةٍ كاملة على مداره (محيط المدار) يجب أن تكون مساويةً لعددٍ صحيحٍ من **الأطوال الموجية الكمومية** لحركة الإلكترون إذا ما نُظِر إليه كموجة. قدّم بوهر الحجّةَ بأنّ هذا العدد يرتبط من خلال ثابت بلانك بطويلة (سعة) شعاع الاندفاع للإلكترون في مداره. يعني ذلك أنّ طويلةَ اندفاع الإلكترون تساوي ثابتَ بلانك h مقسوماً بالطول الموجي الكمومي. يكمن مفتاحُ اللغز بالنسبة إلى الذرة إذاً في أنّ الطولَ الموجي الكمومي يجب أن يتلاءم ويتماشى مع محيط المدار بحيث يكون الأخير مضاعفاً للأول بعددٍ صحيحٍ من المرّات. وهكذا لا يمكن لاندفاع الإلكترون أن يأخذ إلاّ قيماً محدَّدة خاصّة لا غير تتعلّق بحجم وطول مداره. هذه هي الطريقة التي تعمل بها الآلات الموسيقية، إذ لا يمكن إصدارُ إلاّ أصوات ذات أطوال موجية محدّدة ومنفصلة من بوقٍ نحاسيٍّ ذي حجمٍ معيّن أو من مطرقةِ طبلٍ بقطرٍ معطى أو من وترٍ بطولٍ معروفٍ.

وعبر أخذ جميع تلك الأمور بعين الاعتبار، اكتشف بوهر أنّ مجموعةً واحدةً متقطّعةً لا غير من المدارات الخاصة ـ ذات طاقاتٍ مختلفةٍ في ما بينها ـ مسموحٌ بها لحركة الإلكترون في الذرة. يمكن للإلكترون أن يشغلَ واحداً فقط من هذه المدارات في أيّ لحظة، ولكنه يستطيع القفز بينها عند امتصاصه أو إصداره للضوء. توافقت قيمُ طاقات الفوتونات الصادرة التي تنبّأ بها بوهر تماماً مع ما تمَّت ملاحظته في الضوء الصادر عن غاز الهيدروجين عند تسخينه بشدة

(يتمّ ذلك عادةً من خلال تطبيق شرارة كهربائية على أنبوبٍ يحتوي ضمنه غاز الهيدروجين). وهكذا بدأت الخصائصُ الأولية لذرة الهيدروجين بالبزوغ والتجلّي، ولكنّ كثيراً من التفاصيل بقي محيِّراً. لم تكن ماهيةُ ميكانيك الكمّ واضحةً بعدُ، فما هي قواعده الحقيقية والشاملة؟ هل يصحّ تطبيقُه فقط على الضوء والإلكترونات في مداراتها؟ أم أنه من طبيعة أكثر عمومية؟

وأخيراً أتى الإدراك المحرر بالتوصّل إلى أنّ **جميعَ الجسيمات في الطبيعة (وفي جميع الظروف)** تتصرّف دوماً كجسيمات ـ موجات كمومية. اقترح لويس دو برولي (Louis de Broglie) سنة 1924 ـ وكان حينها طالباً في مرحلة الدراسات العليا ـ أنّ الإلكترون (مثل الضوء) هو كائنٌ كموميّ من طبيعة جسيمية ـ موجية في جميع الظروف، وبالتالي يجب أن يكون بالمستطاع كشفُ أنماطٍ تداخليةٍ وانعراجيةٍ في حركة الإلكترونات غير المحصورة ضمن الذرّات والشبيهة بالموجات، مثل الأنماط التي نلاحظها في حالة الضوء. دوَّن لويس المعادلاتِ ذات العلاقة في أطروحة دكتوراه موجَزة لم تتجاوز الثلاث صفحات في جامعة السوربون في باريس. وكان المفتاحُ الرئيسُ في عمل دوبرولي قد وُجِد مسبَقاً ضمن فكرة بوهر عن مساواة اندفاع الجسيم للثابت h مقسوماً على الطول الموجي؛ وبالتالي يمكننا حسابُ الطول الموجي لجسيم ما إذا ما عرفنا اندفاعَه. لكنّ الفكرة الآن أضحت خارج القفص، لأنها غدت صالحةً من أجل **أيّ** جسيم أينما كان وفي أيّ لحظةٍ كانت، وليس فقط من أجل الجسيمات السائرة في مدارات دائرية!

لم يستطع عضو الهيئة التدريسية الشرفي والمميَّز فهمَ بحث دوبرولي، وكان مستعداً لرفض الأطروحة ككّل وترسيب دو برولي في الامتحان. لحسن الحظ أرسل أحدُهم نسخةً من الأطروحة إلى ألبرت

إينشتاين مع رجاءٍ لإبداءِ رأيٍ ثان، وردّ إينشتاين أنّ الشابَ اليافع كاتب الأطروحة يستحق جائزة نوبل وليس مجرّد درجة الدكتوراه. وهكذا نجا دوبرولي من الرسوب بشقّ الأنفس.

تمّت ملاحظةُ الخصائص الموجية للإلكترونات المتحرّكة بحرّية عام 1927 عبر تجربةٍ شهيرة في مخابر بِل (Bell) أجراها جوزيف دافيسون (Joseph Davisson) وليستر غيرمر (Lester Germer)، حيث شاهدا الإلكترونات تعاني تداخلاً انعراجياً ـ مثل الموجات الضوئية ـ عندما كانت ترتدّ عن سطح معدن بلّوري. لقد مثّل ذلك تطوّراً مذهلاً، إذ لم يسبق لأحد من قبل أن وضعَ موضعَ التساؤل كونَ الإلكترونات جسيماتٍ، ولكن ها هي ـ بدورها أيضاً ـ تسلك سلوك الموجات. في الواقع تمّ لاحقاً منح دوبرولي جائزة نوبل للفيزياء عام 1929. لقد وُضعت الآن قطع الأحجية الكمومية معاً ضمن حقيقةٍ جديدةٍ تماماً للطبيعة.

مبدأ الارتياب (عدم اليقين)

تبرز الآن ظاهرة أخرى عجيبة في عالَم ميكانيك الكمّ. تمّت صياغةُ قواعد هذا الميكانيك في جامعة غوتينغن (وهو المكان الذي برهنت فيه إيمي نوثر على نظريتها والذي كانت في ذلك الوقت تتابع فيه أبحاثَها الرياضياتية في مجال الجبر المجرّد). في هذا المكان كان نظريّ لامع اسمه فيرنر هايزنبيرغ (Werner Heisenberg) يطوّر منظومةً رياضياتية تعرِّف بدقةٍ ميكانيكَ الكم. بدا واضحاً لهايزنبيرغ أنّ القواعد الكمومية الجديدة اقتضت ارتياباً وعدمَ يقينٍ في الفيزياء لا يمكن إنكارهما.

من أجل فهم ذلك لنقم بتجربة ذهنية (أي «غيدانكن إكسبيريمنت»). سنفترض أنّ ثابتَ بلانك ليس بذاك المقدار الصغير

الذي ذكرنا قيمته سابقاً، بل هو بالأحرى عدد كبير ضخم. سنفترض أنّ قيمتَه تساوي الواحد ولكن في منظومة وحدات تكون فيها وحدة الكتل هي كتلة سيارتنا، ووحدة المسافة هي طول ولاية نبراسكا (Nebraska)، أمّا وحدة الزمن فهي الساعة الواحدة. ماذا سنجد على الطريق خلال رحلتنا من مدينة شيكاغو (Chicago) في ولاية إيلينوي (Illinois) إلى مدينة أسبن (Aspen) في ولاية كولورادو (Colorado) مروراً بِنبيراسكا؟

سنفترض أننا قسنا سرعةَ سيارتنا عندما مرّت بمحاذاة علامةٍ مسجِّلة للمسافات في الطريق السريع الولاياتي (الواصل بين أكثر من ولاية) ذي الرقم 80 في مكانٍ ما قرب منتصف نيبراسكا. لنفترض أنّ عدّادَ السرعة في السيارة قرّأ القيمةَ 60 ميلاً في الساعة. نتحقّق من القيمة عدة مرّات حتى أننا نضبط جهازَ التحكّم الآلي بالسرعة على هذه القيمة، ونحن متأكّدون من عدم وجود خطأ في عدّاد السرعة لأنه جهازٌ ألماني جيّدٌ ومستورَد، وقد اقترضنا مبلغاً كبيراً من المال من أجل شرائه، وبالتالي فهو حتماً عدّادُ سرعةٍ دقيق!

ننظر الآن عبر النافذة إلى أقرب علامةٍ لتسجيل المسافات في الطريق فنرى أنها تقول «المسافة المقطوعة 186 ميلاً»؛ يعني هذا أننا بعيدون قليلاً عن مدينة أوماها (Omaha) التي قطعناها متجهين غرباً. لقد حدّدنا الآن تماماً موضعَنا على طول الطريق الولاياتي 80، وفي اللحظة نفسها نعود وننظر إلى عدّاد السرعة لنقيس سرعتنا: يا للهول! إنه يشير إلى أننا نسير بسرعة 250 ميلاً في الساعة!

نتفحّص عدّادَ السرعة ونعيد تشغيلَ جهاز التحكّم الآلي بالسرعة، ولكننا عندما نعود وننظر عبر النافذة لتحديد موضعنا مرة أخرى من خلال ملاحظةِ علامةِ تسجيلِ المسافات القادمة نجد أنها تقول «المسافة المقطوعة 30 ميلاً». هذا يعني أننا عدنا قليلاً إلى الوراء واقتربنا من أوماها على الرغم من رحلتنا غرباً وكوننا مررنا

بأوماها قبل حوالي الساعتَين! إنه لأمر غريب لذلك ربّما من الأفضل التوقّف للتزوّد بالوقود وشراء بعض أقراص الأسبرين فالرحلة لا تزال في بدايتها. لكننا عندما ننظر إلى علامةِ تسجيلِ المسافات التالية نجدها تقول «المسافة المقطوعة 320 ميلاً»، إذاً نحن الآن في الحدود الغربية من الولاية عند مدينة أوغالالا (Ogallala)!

عندما نحاول إيقافَ سيّارتنا عند الموقع المحدَّد لمحطة الوقود القادمة نجد أننا لا نستطيعِ ذلك، فنحن وعدّادُ السرعة نغدو كالمجانين نسير بسرعة 50 ميلاً في الساعة ثم 400 ميل في الساعة ثم 136 ميلاً في الساعة. نضغط بكل قوتنا على المكابح لتتوقّف أخيراً السيارة وتصبح سرعتُها معدومة، ولكننا عندما ننظر من النافذة فإننا نجد صورة ضبابية: مدينة أوماها هنا، ومدينة كيرني (Kearny) هناك، وجبال الروكي (Rockies) في كولورادو في ذاك المكان، أما شيكاغو فهي في هذا المكان القريب. نحن في وضع السكون حيث إنّ سرعتَنا مساوية للصفر تماماً، ومع هذا فإننا موجودون حالاً في كلّ مكانٍ في الفضاء! ومرة أخرى، عندما نتأكّد من وجودنا تماماً في محطة التزوّد بالوقود، نجد أنه لدينا جميع السرعات الممكنة والعشوائية حالاً! يبدو أننا لا نستطيع أن نكون **في موضعٍ ما تماماً** وفي الوقت نفسه تكون لنا **سرعة محددة بدقة** (أو اندفاع محدّد بدقة حيث إنه ـ كما نتذكر ـ مساوٍ لحاصل جداء سرعتنا بكتلتنا).

في كلّ مرّة نقيس فيها سرعتَنا (أو اندفاعَنا) بدقّة ـ من خلال النظر إلى عدّاد السرعة والتأكّد من أنه يقرأ قيمةً ثابتةً للسرعة ـ فإننا نكون قد أثّرنا وبطريقة عشوائية على موضعِنا في المكان. وبالمثل في كلّ مرة نحدّد فيها موضعَنا ضمن المكان بدقّة ـ من خلال مشاهدة حجرٍ قريب عليه علامة تسجيل المسافات ـ فإننا نكون قد غيّرنا اعتباطياً من اندفاعِنا (سرعتنا).

يمثّل هذا الأمر كابوساً غريباً كما لو كان قادماً من البرنامج التلفزيوني «منطقة الشفق (Twilight Zone)» لـ رود سيرلِنغ[*] (Rod Serling)، ومع ذلك فكلّ هذا كان سيغدو صحيحاً لو كانت قيمة ثابت بلانك كبيرة؛ ونحن أنفسَنا ـ في مثل هذه الظروف ـ كنّا سنصبح كائناتٍ جسيمية ـ موجية. لحسن الحظ، إنّ ثابتَ بلانك عددٌ صغير جداً في الحقيقة، وبالتالي تعاني الجسيماتُ بالغة الصغر ـ مثل الإلكترونات ـ وحدها هذا المصير.

أمّا في العالَم الكمومي فهذه الظاهرة هي **من صلب الحقيقة.** من الممكن أن نعرفَ تماماً قيمة اندفاع الإلكترون ولكنه حينئذٍ سيكون تلقائياً في جميع الأماكن حالاً، أو بالعكس يمكننا أن نعرفَ في لحظة ما أين يقع الإلكترون تماماً ولكننا سنجده حينها ممتلِكاً لجميع الاندفاعات (أو السرعات) الممكنة حالاً. نستطيع أن نُمَركزَ الإلكترونَ «نوعاً ما» ونجعله متموضعاً ضمن منطقةٍ من الفضاء وأن نعرفَ «نوعاً ما» قيمةَ اندفاعه في الوقت نفسه بشكلٍ نوازن فيه بين الارتيابَين في الكمّيّتَين. ومع ذلك كلما صغر الحيّزُ المكاني الذي نأسر الإلكترون فيه ازداد الارتيابُ والشكّ في قيمة اندفاعه. وهكذا نجد أنه يلزمنا هنا قوةٌ هائلة من أجل احتجاز الإلكترون في حجوم متزايدة في الصغر بسبب ما يقتضيه ذلك من تأرجحاتٍ في الاندفاع متزايدة في الكبر.

في الواقع تدبّر الذرّة أمرَها في تحقيق توازنٍ من خلال القوة الكهرمغناطيسية، لتضع الإلكترون في **مدارٍ إلكتروني**[**] في الفضاء،

(*) كاتب سيناريو أميركي اشتُهر بالمسلسلات الدرامية التي كتبها في خمسينيات القرن العشرين، وكذلك بحلقات برنامجه «منطقة الشفق» عن الخيال العلمي.

(**) منطقة من الفراغ حول النواة يكون احتمال وجود الإلكترون فيها 95 في المئة، وتتميّز بإعطاء أعدادٍ كمومية موافقة لها: مثل المدار 1f أو 2s.

وتقوم مع ذلك بتوفير القوّة الكافية لإبقائه هناك بالرغم من أنّ اندفاعَه يتأرجح ويهتزّ بطريقة عشوائية حول قيمته. هذا هو سبب عدم انهيار الذرّات في ميكانيك الكم (بينما ـ كما ذكرنا ـ كان عليها السقوط والتهاوي في فيزياء نيوتن حيث ثابت بلانك معدوم $h = 0$). استناداً إلى ما سبق يتبيَّن أنّ المدارات الإلكترونية في الذرات لا تشبه مداراتِ الكواكب الكبلرية حول الشمس، فهي أشياء غامضة غير واضحة يمكن النظر إليها وكأنها عبارةٌ عن موجاتٍ مأسورة واقعةٍ في شرك الذرّة، حيث لا يمكن للإلكترون فيها أن يكون له موضعٌ واندفاعٌ محدّدان بدقّة في الوقت نفسه. وهكذا نُشير غالباً إلى حركة الإلكترونات حول النواة في الذرة على أنها تشكّل «غمامةً إلكترونية».

لنُعدْ صياغة بياناتنا بشكلٍ أكثر دقّة. إنّ حاصلَ جداءِ الارتياب في قيمة الاندفاع بالارتياب في الموضع أكبرُ دوماً من قيمة ثابت بلانك مقسومةً على 2p، ويُدعى هذا الأمر بـ**مِبدأ الارتياب (الشكّ وعدم اليقين) لهايزنبرغ**[5]. لنشدّد هنا على القول بأنّ هذا الأثر

---

(5) يقتضي مبدأ الارتياب أننا إذا حاولنا تحديد موقع جسيم ما في المكان ضمن منطقة صغيرة جداً مقاسها Δx (في الاتجاه x)، فإنّ الارتياب Δp_x فيّ مركّبة اندفاع الجسيم على المحور x سيكبر ليصير على الأقلّ مساوياً لـ $\Delta p_x \leqslant h/2\pi\Delta x$. وبشكلٍ مماثل إذا أردنا تحديد لحظة حادثةٍ ما في الزمن ضمن مجال زمني صغير جداً Δt، فإننا لا محالة سوف نخلق اضطراباً طارئاً على المنظومة ونسبّب ارتياباً في طاقتها ΔE حيث $\Delta E\, \Delta t \geqslant h/2\pi$، وبالتالي كلّما صغر Δt كبر ΔE لأن $\Delta E \geqslant \hbar/\Delta t$. يبلغ القدّ (المقاس) النموذجي لمدارات الإلكترونات الذرّية في غالبية الذرّات حوالي ($\Delta x \approx 10^{-10}$) متر، وذلك في أيّ اتّجاه من المكان. يتوجّب على الإلكترونات في حركاتها المدارية إذاً بسبب مبدأ هايزنبرغ في الارتياب ـ أن تمتلك اندفاعاتٍ متنوّعةً تغطّي مجالاً من القيم يصل في كبره إلى $\hbar/\Delta x \geqslant \Delta p_x$، وبالتالي ($\Delta p_x \approx 10^{-24}$) كيلوغرام ـ متر في الثانية. تتحرّك الإلكترونات في مداراتها بسرعات أصغر بكثير من c (ويعني ذلك أنها **غير نسبوية**)، وحيث إننا نعرف قيمة كتلة الإلكترون ($m_e \approx 9.1 \times 10^{-31}$) كيلوغرام، فإننا نستطيع تقديرَ قيمةِ الطاقة الحركية النموذجية للإلكترون لتكون في رتبة عِظَم ($E \approx (\Delta p_x)^2/2m_e \approx 6 \times 10^{-19}$) جول أو 3,8 إلكترون =

حقيقي، ولا يمكن إزالته أو إنقاصه من خلال استخدام أدواتِ قياسٍ أفضل أو عبر ضبطٍ أدقّ لجهاز القياس، فكلّما ازدادت دقتنا في تحديد قيمة اندفاع (سرعة) كائنٍ ما نقصت الدقة في معرفة موضعه والعكس بالعكس. إنّ حاصلَ جداءِ عدم الدقّة في الاندفاع بعدم الدقّة في الموضع هو... ثابت بلانك.

للعلاقة العكسية بين الاندفاع والطول الموجي (أو بين عدم الدقّة في الاندفاع وعدمها في الموضع) نتائج عملية. نحتاج من أجل دراسة شيءٍ صغيرٍ جداً إلى استخدام مسبار يكون سبرُه أصغرَ من الشيء الذي نرغب بدراسته. وهكذا يجب أن يكونَ الطولُ الموجي للمسبار الذي نعتمده عند استعمال المجهر أصغرَ من الشيء الذي نتفحّصه[6]. بما أنّ الطولَ الموجي للضوء المرئي هو حوالي

= فولط (1 إلكترون فولط = ($1,6 \times 10^{-19}$) جول؛ لقد قمنا بكثير من تدويرات الأعداد[تقريب العدد الحقيقي إلى أقرب عدد صحيح له] والحسابات «على ظهر المغلّف البريدي» [يعني تعبيرُ إجراءِ «حسابات على ظهر المغلّف البريدي Back of the Envelop (Calculations . القيامَ بحساباتٍ تقريبية] للحصول على هذه القيمة التقديرية). يجب على القوة التي تُبقي الإلكتروناتِ في مداراتها إذاً أن تقدّم طاقةً كامنة سالبة تتجاوز قيمتُها المطلقة هذه النتيجة. يجري تأمينُ ذلك من خلال القوة الكهرمغناطيسية، ويبلغ المقاسُ النموذجي لـ**طاقات الارتباط** للإلكترونات في الذرّة (أي الطاقة الواجب تزويدها من أجل تحرير الإلكترونات) هذه المرتبةَ، فتغطّي مجالاً يمتدّ من 0,1 إلى 10 إلكترون فولط. في الحقيقة يُعتبر هذا المجالُ المقياسَ الطاقيّ النموذجي لجميع العمليات الكيميائية، وهو يحتوي على الطاقات النموذجية لفوتونات الضوء المرئي.

(6) يمكنك من أجل تبيان ذلك إجراء التجربة الصغيرة الآتية في المنزل أو في قاعة الصفّ. قُم بعصب عينَي شخصٍ جالسٍ على طاولة، ثم ضَع فوق الطاولة أشياءَ صغيرة عديدة ـ على سبيل المثال قلم رصاص ومفكّ براغي وقطعة ربع دولار نقدية وقطعة حلوى... إلخ ـ ثم أعطِ الشخصَ معصوب العينين بالوناً، واطلب منه أن يلمس هذه الأشياء مستخدماً البالون فقط وأن يحاول معرفة ماهيتها: ما هو شكلها؟ وكم من الأشياء هناك؟ من الصعوبة بمكان ـ عند الاقتصار على استخدام البالون واستعماله كمسبارٍ للكشف عن الأشياء الصغيرة ـ بل من المستحيل الإجابة عن هذه الأسئلة. قُم الآن بإعطاء الشخص=

($5 \times 10^{-5} = 0,00005$) متر، فإنّ المجهر الضوئي **لا يقدر** أن يميّزَ ويتحسّس كائناتٍ أصغر من مقياس المسافة هذا. إذا أردنا فحصَ أجزاءِ نويّةِ خليةِ كائنٍ حيّ بواسطة مجهر في مختبرٍ بيولوجي، فإنها سوف تظهر مبهمة وضبابية لأن قدّها صغير بحيث يقارب مقياس المسافة الصغير المذكور أعلاه، أمّا الأشياء الأصغر من ذلك فلن يكون بالمستطاع تمييزُها أبداً. يمكننا استخدامُ أثمنِ المجاهر الضوئية التي يمكن شراؤها ومع هذا لن تزول هذه الضبابية، ويعود السبب في ذلك إلى الطبيعة الموجية للضوء وإلى أنّ طوله الموجي أكبر من الشيء الذي نرغب في رؤيته.

للتغلّب على العقبة السابقة نتذكّر أنّ دوبرولي علّمنا بأنّ للإلكترونات خصائص شبه موجية، وفي الواقع من السهل جعلُ طولِ موجة الإلكترون أصغرَ بكثير من طول نويّة الخلية البيولوجية. نحتاج فقط إلى **تسريع** الإلكترون ليكتسبَ اندفاعاً كبيراً مماثلاً تقريباً لِما يفعله أنبوب التفريغ المهبطي المسلَّط على شاشة التلفزيون. وهكذا يمكن للمجاهر الإلكترونية تمييزُ وفصلُ الملامح والهيئات بوضوحٍ أكبر ممّا في المجاهر الضوئية. من أجل دراسةِ كائناتٍ أكثرَ صغراً وبمقاييس مسافاتٍ أكثر قصراً نحتاج إلى إجراء عملياتِ سبرٍ باندفاعاتٍ أكثر كبراً أي بطاقاتٍ أعلى. وهكذا نحتاج عند دراسة بنية المادة ضمن نواة الذرة إلى مسرّع جسيمات كبيرٍ وفعّال يستطيع إجراءَ عملياتِ سبرٍ بأطوال موجية كمومية من أصغر ما يمكن. ليست مسرّعات الجسيمات والكواشف في حقيقتها إلاّ مجاهر ضخمة.

= زوجاً من العصي الصينية المستخدمة لتناول الطعام أو قطعةَ قشٍّ طويلة من مكنسة. يستطيع الشخصُ عبر لمسه للأشياء بهذا المسبار الصغير والدقيق ـ ومع قليلٍ من الخيال والمنطق ـ إعادةَ إنشاء صورةٍ عقلية للشيء الذي يلمسه ووضعَ فرضيةٍ منطقيةٍ عن ماهيّته.

التابع الموجي

لنتساءل الآن: إذا كانت الجسيمات تستطيع أن تتصرّف كالموجات، فما هو الشيء الذي يتموّج فيها؟

لنفترض أن لدينا إلكتروناً واحداً لا غير في منطقة كبيرة جداً من الفضاء. يُعَدّ هذا الافتراض **تقريباً** نُعامِل فيه الجسيمَ كما لو كان معزولاً عن كلّ شيءٍ آخر في الكون. في الحقيقة يُعتبَر هذا التقريب ممتازاً بالنسبة إلى الجسيمات المتحرّكة بحرّية سواء أكانت إلكترونات أم جسيمات ضوء (فوتونات) أم نترونات أم بروتونات أم ذرّات (منظوراً إليها كجسيمات) عندما تجول بحرّيةٍ في الفضاء (أو حتى ـ بدرجة أقلّ من الحرّيّة ـ عندما تطوف ضمن المادة الممثّلة لمعدن أو غاز).

كيف يمكننا وصفُ جسيم وحيد منعزل؟ كان نيوتن (في الفيزياء التقليدية) وإينشتاين (في النسبيةّ الخاصة) سيجيبان ببساطة أنّ الجسيمَ في اللحظة t موجودٌ في الموضع x من المكان، ثم تسمح «معادلات الحركة» بتحديد موقع الجسيم الجديد x’ في لحظةٍ تالية t’. يركّز مثلُ هذا الوصف على المظهر الجسيمي للكائن ولكنه يُخفق تماماً في تبيان المظهر الموجي، وبالتالي علينا التخلّي عن مثل هذه الطريقة في الوصف في ميكانيك الكمّ.

مع ذلك كان الفيزيائيون معتادين على وصف الأمواج (التقليدية) في الأوساط المادية المستمرّة ـ مثل انتشار الموجات الصوتية في الهواء (الذي يحتوي على الكثير الكثير من الجسيمات) ـ قبل اختراع ميكانيك الكمّ بوقتٍ طويل. لنتناول على سبيل المثال موجةً مائيةً في المحيط. يمكن توصيف هذه الموجة من خلال كمية رياضياتية تمثّل سعة موجة الماء Y(x,t) (يُدعى الحرف اليوناني Y باللاتينية psi

ويُلفَظ «ساي»). رياضياتياً Y(x,t) هو «تابع»؛ أي إنه يحدّد مقدارَ ارتفاع الموجة المائية بالنسبة إلى مستوى البحر في كلّ نقطة من المكان x وفي كلّ لحظة t. يظهر الشكلُ الذي يتخذّه تابعُ الموجة المنتشرة بطريقةٍ طبيعية، لأنه في الحقيقة حلّ للمعادلات التي تصف حركة الماء عندما يضطرب وتتمّ إهاجته. وهكذا توصَف جميعُ الأمواج المحطِّمة أو الأمواج المدّية (التسونامي) أو أيّ شكلٍ من أشكال الموجات المائية وهيئاتها بمعادلة تفاضلية واحدة تحدّد «التابع الموجي» للماء Y(x,t)، أي ارتفاع أو سعة الماء عند النقطة x وفي اللحظة t. نرغب الآن بسرقة مفهومِ عن الموجة مثل التابع Y(x,t) واستعماله في ميكانيك الكمّ. لكننا عندما نرتكب هذه السرقة نصابُ بدايةً بالارتباك حول ما الذي نقوم به فعلاً.

فُتن الفيزيائيُ الشاب إروين شرودينغر (Erwin Schrödinger) ذو الموهبة الرياضياتية القوية بأطروحة دوبرولي، وقدّم محاضرةً عنها في سنة 1924 في مكان عمله جامعة زوريخ (Zurich). اقترح أحدُ الحضور أنه لو كانت الإلكترونات تتصرّف فعلاً كالموجات، فعندها لابدّ من وجود **معادلة موجية** تصف حركتها تماماً كحالة المعادلات الموجية التي تصف حركة الموجة المائية.

وسرعان ما خطرت على بالِ شرودينغر فكرة مبصِّرة ومنوِّرة، إذ لاحظ أنّ طريقة الصياغة الرياضياتية المعقَّدة والمُرعِبة لهايزنبيرغ يمكن في الحقيقة كتابتُها بأسلوب يجعلها تبدو مماثلةً تماماً للمعادلات الفيزيائية المألوفة التي تصف الاضطرابات والحركات الموجية. ومن أجل ذلك يمكن للمرء أن يقول ـ على الأقل صورياً ومن ناحية الشكل ـ إنّ التوصيف الصحيح للجسيم الكمومي يتضمّن تابعاً رياضياتياً جديداً Y(x,t) أطلق عليه شرودينغر تسمية «التابع الموجي». نستطيع الآن باستخدام آلية ومكننة النظرية الكمومية كما

يفسّرها شرودينغر - أي من خلال حلّ «معادلة شرودينغر» - أن نحسب التابع الموجي للجسيم[7]. مع ذلك لم يكُن هناك أيُّ شخص - في هذه المرحلة بالذات - يعرف ماذا يعني فعلاً هذا التابع الموجي في النظرية الكمومية.

إذاً من الآن فصاعداً لا نستطيع في ميكانيك الكم القول بأنّ الجسيم في اللحظة t يقع في الموضع $\vec{x}$. بل بالأحرى يجب أن نقول إنّ الحالة الكمومية لحركة الجسيم هي التابع الموجي Y(x,t) الذي يعطي **السعة (الطويلة) الكمومية** Y في الموضع $\vec{x}$ وعند اللحظة t. لم يعد الموضعُ الدقيق للجسيم معروفاً، باستثناء تلك الحالات التي تكون فيها سعة التابع الموجي كبيرةً جداً في موقع معيّن $\vec{x}$ وقريبةً من الصفر في الأماكن الأخرى، حيث نستطيع القول عندها إنّ الجسيم متوضّع بالقرب من هذا الموقع. لكنْ في الحالة العامة يمكن للتابع الموجي أن يكون ممتداً ومنبسطاً في المكان مثل الموجة المنتشرة المرسومة في الشكل 22، وعندها لن نعرف أبداً - حتى من حيث المبدأ - أين يوجد الجسيم فعلاً. يجب أن نضعَ نصب أعيننا أنّ الأمورَ بالنسبة إلى الفيزيائيين عند هذه المرحلة من تطوّر فكرة التابع الموجي - بمن فيهم شرودينغر نفسه - كانت لا تزال مبهمة وغامضة جداً في ما يخصّ طبيعة التابع الموجي وماذا يعني فعلاً.

مع ذلك نصادف هنا انعطافاً في مسيرة رحلتنا يمثّل دمغةً وميزةً مذهلةً لميكانيك الكم. لقد وجد شرودينغر أنّ التابع الموجي الذي يصف جسيماً ما هو تابع مستمر في المكان والزمان - مثله في ذلك

(7) من أجل معلوماتٍ إضافية عن شرودينغر، انظر: J. J. O'connor and E. F. Roberston, «Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger,» www-gap.dcs.st-and.ac.uk

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 10 حزيران/ يونيو 2004).

مثل أي موجة ـ ولكنّ القيمَ التي يأخذها **ليست** الأعدادَ الحقيقية المألوفة. **يختلف** الأمر هنا عن حالة موجة الماء ـ أو حالة الموجة الكهرمغناطيسية ـ التي تُعطى سعتها دوماً كـ**عدد حقيقي** في كلّ نقطة من المكان والزمان. في حالة الموجة المائية ـ على سبيل المثال ـ نستطيع القول إنّ ارتفاع الأمواج من الغور إلى الذروة يبلغ عشرة أقدام، أي إنّ سعة الموجة هي خمسة أقدام، وبالتالي يمكن إصدار تقرير استشاري صغير بخصوص حركة المركب. كذلك يمكن أن نقول إنّ سعة موجة التسونامي القادمة تبلغ عند الشاطئ خمسين قدماً، وبالتالي فهي موجة مدّية هائلة. يُعبَّر عن السعة هنا بأعدادٍ حقيقية يمكن قياسها من خلال أدواتٍ وأجهزةٍ متنوّعة، وجميعنا يدرك ماذا تعنيه بالضبط.

مقابل ما سبق ظهر أنّ القيمَ التي تأخذها سعة التابع الموجي الكمومي هي أشياءُ تُدعى بـ**الأعداد العقدية (أو المركَّبة)**[8]. يمكن أن

---

(8) إنّ الخروج عن الموضوع لذكر نوعٍ من الاستطراد القصير عن الأعداد يبدو ضرورياً هنا. لقد تمّ اكتشاف الأعداد الحقيقية على يد اليونانيين القدماء، ورغم أنّ أمر توجّب «اكتشاف» الأرقام قد يبدو غريباً، لكنْ هذا ما حصل في الواقع الفعلي. بدأ ذلك بالأعداد البسيطة التي تخدم العدّ، أي الأعداد الطبيعية 0، 1، 2، 3، . . . إلخ. التي تمّ اكتشافها أثناء عدّ الغنم والنقود وأمثالها، وسرعان ما اكتُشِف وجودُ أعداد صحيحة سالبة: ـ 1، ـ 2، ـ 3، . . . إلخ، حدث هذا الاكتشاف عندما «اخترع» أحدهم عملية الطرح وحاول طرح 4 من 3. اخترع الفيثاغوريون كذلك عملية القسمة واكتشفوا **الأعداد العادية** (الكسرية)، أي الأعداد التي يمكن كتابتها كنسبةٍ بين عددين صحيحَين مثل 3/4 أو 28/9... إلخ اكتشف الفيثاغوريون كذلك **الأعداد الأوّلية** أي الأعداد الصحيحة التي لا تقبل القسمة على عدد صحيح إلاّ نفسها (والواحد) مثل 2، 3، 5، 7، 11، 13، 17، . . . إلخ. لذلك $(5 \times 3 = 15)$ ليس عدداً أولياً ولكنه يحتوي على **العاملَين الأوليَّين** 3 و5. بمعنىً ما تكون الأعداد الأوّليّة هي «الذرّات» التي يمكن بناء جميع الأعداد الصحيحة منها عبر عملية الضرب. للأعداد الأوّليّة أهمّيّة جمّة في مجال الرياضيات، ولاتزال محلَّ اهتمامٍ كثيرٍ من الدراسات الجارية عن خصائصها لغاية اليوم. لم يقبل فيثاغورس نفسه فكرةَ وجود أعداد أخرى لا يمكن كتابتها =

نقول من أجل موجةٍ كموميةٍ ما إنّ سعتها في نقطةٍ معيّنة من المكان تبلغ $3+5i$ حيث $i=\sqrt{-1}$؛ ويعني ذلك أنّ i هو العدد الذي إذا ضربته بنفسه فإنك تحصل على النتيجة 1-. إنّ الأعدادَ التي تتكوَّن من أعدادٍ حقيقيةٍ مجموعٌ لها أعدادٌ حقيقية مضروبة بـ i هي أعداد عقدية. هذه الأعداد كانت ستسبّب الحزن لفيثاغورس، لكنْ في الحقيقة تتضمّن معادلة شرودينغر نفسها دوماً وبطريقة أساسية المقدارَ $i=\sqrt{-1}$، وهذا ما يُلزم التابع الموجي على أن يأخذ قيماً عقدية. لا

= كنسبةٍ (كسرٍ) بين عددَين صحيحَين، ولكنّ أعداداً مثل $\sqrt{2}$ وπ هي **أعداد غير عادية** ولا يمكن كتابتها كنسبةٍ بين عددين صحيحَين. من الصعب البرهان على أنّ d عدد غير عادي، أمّا برهان أنّ $\sqrt{2}$ عدد غير عادي فهو أمر سهل (قدّم إقليدس نفسه البرهانَ على ذلك)، ويمكن إيجاد مثل هذه «البراهين» في الإنترنت. تشكّل جميعُ الأعداد ـ الصحيحة الموجبة والسالبة والأعداد العادية وغير العادية- معاً الأعدادَ الحقيقية، وهكذا هناك بنية مميّزة لمستقيم الأعداد المستمرّ.

اكتشف الرياضياتيون بعدها **الأعداد العقدية (المركّبة)**. على سبيل المثال إذا أردنا حلّ المعادلة $x^2=-9$، فإنه ليس هناك أيّ عدد حقيقي يحلّ هذه المعادلة. نخترع لهذا الغرض عدداً جديداً ندعوه i ويُعرّف على أنه $i=\sqrt{-1}$. هناك إذاً حلّان للمعادلة أعلاه هما $x=3i$ و$x=-3i$. نستطيع عندئذٍ بناء أعداد من الشكل $z=a+bi$ حيث كلا a وb عددان حقيقيان، وتُدعى هذه الأعداد بالأعداد العقدية. نعرّف **المرافق العقدي** لـ z بأنه العدد $z^*=a-bi$، أمّا **طويلة (نظيم)** z فهي $|z|=\sqrt{zz^*}=|\sqrt{a^2+b^2}|$. تمثّل **الأعداد التخيلية** بعداً ثانياً أو محوراً عمودياً على مستقيم الأعداد الحقيقية الاصطلاحي. يقودنا ذلك إلى المستوي العقدي حيث يمثّل محور الـ x مستقيمَ الأعداد الحقيقية الاعتيادي، بينما يمثّل محور الـ y مجموعةَ كلّ الأعداد الحقيقة مضروبةً بـ i؛ وبذلك تكون الأعداد العقدية أشعةً في المستوي العقدي. تربط نظريةٌ فائقةُ الأهمّيّة بين التابع الأسّي لعدد تخيّلي وبين الأعداد العقدية من خلال توابع مثلّثيّة: $e^{i\theta}=\cos(\theta)+i\sin(\theta)$. يُعطى البرهان على هذه النظرية غالباً ضمن مقرّرٍ في التحليل الرياضياتي باستخدام متسلسلات (نشر) تايلور (Taylor)، ولكنْ يمكن في الحقيقة برهانها باستخدام خصائص التوابع الأسّيّة و«نظرية الجمع» للتوابع المثلّثيّة (حاول ذلك!). باستخدام هذه النتيجة يمكن كتابة أيّ عدد عقدي على الشكل $z=\rho e^{i\theta}$، حيث r وθ عددان حقيقيّان، وعندها تُعطى الطويلة بـ $|\rho|=|\sqrt{zz^*}|=|z|$. هذا هو تمثيل الإحداثيات القطبية للمستوي العقدي.

يمكن الإفلات والهرب من هذا الانعطاف الرياضياتي في طريقنا نحو النظرية الكمومية[9].

يشير لنا ذلك وبقوة إلى أننا لن نستطيع **أبداً** قياس التابع الموجي لجسيم ميكانيكيّ ـ كموميّ، لأننا لا نقدر عبر إجراء التجارب إلاّ علىَ قياس مقادير تتمثّل بأعداد حقيقية دوماً. أرخى السؤالُ عن كيفية تفسير التابع الموجي بظلّه أكثر فأكثر الآن على مخيّلة الفيزيائيين، وكان الفيزيائي الألماني البارع ماكس بورن هو من أتى بالجواب. قدّم بورن ـ الذي عمل خلال العشرينيات مع وولفغانغ باولي وفيرنر هايزنبيرغ في جامعة غوتينغن في الوقت نفسه الذي أقامت فيه إيمي نوثر هناك ـ تفسيراً فيزيائياً للتابع الموجي منح ميكانيك الكمّ قوةً وسلطةً كبيرتَين، ولكنه في الوقت نفسه صار كشبحٍ لازَم ميكانيكَ الكمّ وطارده منذ ذلك الحين. اقترح

---

(9) عند هذه النقطة سيقول عددٌ من الطلاب: «من المؤكّد أنكما تمزحان! ألا تعنيان أنكما تستخدمان الأعداد العقدية كنوع من الأدوات الرياضياتية المريحة لا غير (كما يفعل بعضهم في الهندسة الكهربائية)، وأنه في الحقيقة لا معنى فيزيائياً لاستخدام الأعداد العقدية في المعادلات الفيزيائية؟»، وستكون إجابتنا عن هذا السؤال: «لا! إننا لا نمزح!». هناك فعلاً أعداد عقدية في ميكانيك الكمّ، والتابع الموجي **هو حقيقةً** تابع للزمكان يأخذ قيماً عقدية. نستطيع بالطبع إرجاع الأمور برمّتها إلى أزواج من الأعداد الحقيقية وإجراء مجمل الحسابات الرياضياتية ـ بعد بذل جهدٍ كبير ـ من دونَ التكلّم إطلاقاً عن التركيبات التي تتضمّن الجذر التربيعي لـ ـ 1 (أي خ)، ولكن لا فائدة تُجنى من فعل هذا. سيكون ذلك مماثلاً للتكلّم بطريقةٍ مستترة عن مرضٍ اجتماعي مرعب في حفلة كوكتيل من دون التلفّظ الفعلي باسم المرض، مع أنّ الجميعَ في الحفلة يكونون قد فهموا ما الذي نتحدّث عنه، وعاجلاً أم آجلاً قد يفشي أحدُهم السرّ فيلفظ الاسمَ. تكمن الحقيقة إذاً في أنّ الجذر التربيعي لـ ـ 1 (i) يؤدي دوراً **أساسياً** في رياضيات ميكانيك الكمّ. من الواضح أنّ الطبيعة تقرأ كتباً عن الأعداد العقدية! لا نعرف سبب ذلك ولكننا نعرف أنه أمر صحيح. وعلى أساس ذلك نسأل ماذا يشبه التابع الموجي لجسيم كمومي؟ باستخدام معادلة شردوينغر الموجية نجد أنّ جسيماً حرّاً متحرّكاً هو مَوجة بتابعٍ موجي يأخذ الشكل: $\psi(\vec{x},t) = A(\cos(\vec{k}\,\vec{x} - \omega t) + i\sin(\vec{k}\,\vec{x} - \omega t))$، حيث $|\vec{k}| = 2\pi/\lambda$ و $\omega = 2\pi f$.

بورن متأثِّراً بقوّة بمبدأ عدم اليقين لهايزنبيرغ أنّ مربّع القيمة المطلقة(*) (مربّع الطويلة) للتابع الموجي - وهو دوماً عدد حقيقي وموجب - يمثّل احتمالَ **أن نجدَ الجسيمَ** في موقعٍ معيّن من الفضاء وعند لحظة زمنية معطاة:

$|\psi(\vec{x}, t)|$ = احتمال وجود الجسيم في الموقع $\vec{x}$ وفي اللحظة t.

وهكذا يقفل تفسيرُ بورن لتابع شرودينغر الموجي المزلاجَ بإحكام على مفهومَي الجسيم والموجة ويشبكهما معاً، ولكنه أيضاً تفسيرٌ مريعٌ أو مُذِلّ تبعاً للمنظور الذي تراه منه: إذ يجب على الفيزياء من الآن فصاعداً أن تتعامل مع مفهوم الاحتمال **كمكوِّن أساسيّ في النظرية الفيزيائية.** لن نستطيع الاستمرارَ بتقديم بياناتٍ وتصاريحَ عن المواقع والحركات المألوفة للأشياء. علينا أن نرضى - وفقاً لقوانين الفيزياء نفسها - بمعلوماتٍ أقلّ وأكثر محدودية عن نتيجة التجربة الفيزيائية. بخلاف لغة نيوتن أو إينشتاين، لا يمكننا الآن التكلّم عن الموضع الدقيق $\vec{x}$ للجسيم في اللحظة t، بل بالأحرى كلُّ المعلومات المتوفرة لدينا موضوعةٌ الآن ضمن Y(x,t)، أي ضمن قيمة التابع الموجي الكمومي عند الموضع $\vec{x}$ وفي اللحظة t، ووحدُه مربّعُ قيمته المطلقة (طويلته) هو ما يمكن قياسه. في الحقيقة كان ماكس بورن هو من استحدث تسمية **ميكانيك الكمّ**، وكان أيضاً جدّاً لمغنية البوب أوليفيا نيوتن جون[10] (Olivia Newton-John).

(*) تساوي القيمةُ المطلقة (أو النظيم) لعدد عقدي الجذرَ التربيعي لمجموع مربّعَي قسمَيه الحقيقي والتخيّلي.

(10) من أجل معلومات إضافية عن ماكس بورن، انظر: J. J O'connor and E. F. Roberston, «Max Born,» www-gap.dcs.st-and.ac.uk

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 تموز/ يوليو 2004).

إنّ ميكانيك الكمّ نظرية احتمالية في جوهرها وذاتها، ولقد عُدّ مفهومُ عدم قدرةِ الفيزياء عند المستوى الذري على التنبّؤ بأكثر من قيم احتماليةٍ لا غير افتراقاً فلسفياً هائلاً عن الفيزياء التقليدية، بحيث استغرق الأمر سنيناً (ودموعاً) كثيرة قبل أن يتمّ قبول هذا الإدراك الجديد وهذه الفكرة من قبل الفيزيائيين.

إليكم هذا المثال: لنفترض أنك كنتَ سائراً في يومٍ مشمس في طريق مزدحم، وأنك مررت بمحاذاة دكّان دانماركي لبيع الحلويات (مخبز)، فنظرت عبر نافذته لترى معجّناتٍ وفطائرَ دانماركية لذيذة يسيل لمجرّد مشاهدتها اللعاب. في الوقت نفسه ترى صورةً باهتة، ولكن يمكنك تمييزُها فهي صورة انعكاسك عن زجاج النافذة. ما الذي يحصل؟ تسقط أشعة الشمس ـ أي دفقٌ من الفوتونات ـ على وجهك، فينعكس قسمٌ منها ويتّجه نحو النافذة. وعند النافذة يتابع عديدٌ من الفوتونات طريقَه عبرها، ليضيءَ قطع تورتة الجبن المدوّرة والمرصّعة بحبّات التوت (Raspberry Cheese Swirl) في الداخل، ولكنّ قسماً آخر سوف ينعكس ويعود إلى عينيك ولذلك ترى نفسك، فيجول في خاطرك («همم... هذا بحجم 36 في النهاية، ربّما عليّ ألاّ أقف بالقرب من محلّ حلويات»). يمثّل كلُّ هذا أموراً معقولة وممكنة في الفيزياء التقليدية إلى أن نسأل عمّا يحدث لفوتونٍ واحد منفرد: ما الذي يقرّر لفوتونٍ معيّن خاصّ إذا كان سينعكس أم سينفذ خلال لوح الواجهة الزجاجية؟

تصدمنا الإجابةُ عن هذا السؤال بعد حلّ معادلة شرودينغر: **هناك قسمٌ من التابع الموجي للفوتون الوحيد المنفرد ينفذ عبر الزجاج وقسمٌ آخر ينعكس إلينا.** إذاً نستطيع فقط أن نقول إنّ هناك إمكانية باحتمالٍ معيّن للفوتون كي ينفذ عبر الزجاج؛ ولنفترض أنّ القيمة التربيعية لقسم التابع الموجي النافذ تساوي 98 في المئة، بينما يبلغ

مربّع القسم المنعكس 2 في المئة. لم ينقسم الفوتون نفسه إلى قطعتين اثنتين ـ واحدة نفذت والأخرى انعكست ـ ولكنّ تابعه الموجي فعل ذلك! فالفوتون في النهاية إمّا أن ينفذ بشكلٍ قاطع أو لا، ولكننا لا نستطيع حساب إلاّ احتمال حصول نتيجةٍ معيّنةٍ ما لا أكثر. تكمن إذاً إجابةُ ميكانيك الكمّ على هذه الظواهر في أننا حتى لو عرفنا كلّ شيءٍ عن لوح الزجاج والفوتونات وعن الحلويات والمعجّنات الدنمركية، فإننا لن نقدر على فعل شيءٍ أجودَ من حساب احتمال انعكاس الفوتون عن لوح الزجاج أو نفوذه منه.

بسبب هذه الطبيعة الاحتمالية للحقيقة الفيزيائية، لم يقبل إينشتاين أبداً بصحة ميكانيك الكمّ. صرّح إينشتاين بقوله الشهير: «على كلّ حال، أنا مقتنع بأنه [الخالق] لا يرمي أحجار النرد». مع ذلك نحن نرى في حالة اصطدام الفوتون مع نافذة مخبز الحلويات أنّ قرارَ الانعكاس أو النفوذ هو في الحقيقة رميةُ حجرِ نرد. في واقع الأمر كان تقدّم النظرية الكمومية وارتقاؤها يسيران بخطىً حثيثة خلال منتصف العشرينيات، بينما كان **عصر إينشتاين الأعجوبي** ـ الفترة الموافقة لأفكاره وإلهاماته التي هزّت الأرض ـ قد وصل إلى نهايته فعلياً. إنّ جميع الفيزيائيين اليوم (ما خلا مجموعةً هامشية منهم) يقبل وبقوة صلاحيةَ ميكانيك الكمّ.

الحالة المقيّدة

يمكن للقوة في الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية) أن تتسبّب بأسر واحتجاز الجسيم ووضعه ضمن **حالةٍ مقيّدة**. لقد رأينا هذا الأمر في المدارات الكبلرية للكواكب الدائرة حول الشمس حيث تنجذب الكواكب بفعل الثقالة إلى الشمس، فيمكن القول إنها تتحرّك ضمن الكمون الثقالي حول الشمس. نعرف أنّ أمراً مماثلاً يحدث في حالة

الذرات، فنحصل على حالات الحركة المتقطّعة لبوهر. كيف يتمّ حدوث هذا بدلالة السلوك الموجي للجسيم؟

يمكن فهم ذلك بطريقة سهلة من خلال تناول المثال التالي البسيط لإلكترون مقيّد ضمن جزيءٍ طويل الشكل. تُثبت الحسابات في آخر المطاف أنّ شكل التابع الموجي لإلكترونٍ محصور ضمن جزيءٍ متطاول هو تماماً نفسُ شكلِ وتر القيثارة المتحرّك عندما ننقره. في الحقيقة يمكننا بسهولة أيضاً حساب المستويات الطاقية للإلكترون المحتجَز من خلال التفكير والمقارنة مع حالة اهتزازات وتر القيثارة.

لنفترض أنّ جسيماً كمومياً ـ ولنقل إلكتروناً على سبيل المثال ـ سقط في خندقٍ طويل ندعوه **ببئر كمومي وحيد البعد**. يعني هذا أنّ هناك قيوداً على مواضع الإلكترون المسموح بها، وذلك بواسطة القوى المتنوّعة الكهرمغناطيسية وترتيب الذرّات في الجزيء المتطاول، بحيث لا يمكن للإلكترون الحركة إلاّ ضمن منطقة محدودة مقيّدة.

لنمعن النظرَ بمثال الخندق ذي الطول المحدود L الذي سقطت فيه كرة تنس (تقليدية). عندما تصل كرة التنس إلى نهاية الخندق، فإنها سوف ترتدّ وتتدحرج إلى النهاية الأخرى، وهناك سترتطم بالجدار لتغيّر اتجاهها وتعود أدراجها من جديد متدحرجةً نحو الجدار في الطرف الآخر، وهكذا دواليك. إذا كانت حوادث الصدم هذه **تامّة المرونة** محافِظةً على الطاقة الحركية للكرة، فإنّ الكرة سوف تستمرّ في تدحرجها داخل الخندق إلى الأبد مرتدّةً عند كلا الجدارَين الطرفيَّين وعاكسةً اتجاهها في كل مرّة. عندما تكون طاقة الكرة معدومةً، فإنها سوف تركن إلى السكون وتقف في مكانٍ ما من الخندق. مع ذلك لنتخيّل الآن أننا استبدلنا بالكرة إلكتروناً محتجَزاً

ضمن خندقٍ ضيّق وعميق، فعندها سوف تصبح الآثار الكمومية ذات أهمّية بالنسبة إلينا.

اذهب الآن واجلب تلك القيثارة القديمة المغبرّة من خزانتك شريطةَ احتفاظها على الأقلّ بوترٍ واحد متبقٍّ. إنّ وتر القيثارة مُثبَّتٌ ومُشبَكٌ في مكانيَن، أحدهما على جسر القيثارة (مشطها)(*) والآخر عند الصَّمولة (الحَزَقة)(**) قرب طرفِ القسم العلوي من القيثارة. عندما ننقر وتر القيثارة فإنه يهتزّ مُصدراً صوتَ علامة موسيقية. تمثّل اهتزازاتُ وتر القيثارة **موجاتٍ مستقرّة** أو **مقيَّدة**. في الواقع إذا كان طول الوتر لامتناهياً في الكبر، فإننا عندما ننقره نولّد موجةً تنتشر على طوله نحو اللانهاية ممثِّلةً في ميكانيك الكمّ جسيماً حرّاً يتحرّك في الفراغ. ولكنّ وترنا القيثاري له طول محدَّد L (يمثّل المسافة من الحزقة إلى المشط)، وتبلغ قيمته النموذجية حوالي مترٍ واحد من أجل قيثارةٍ عادية.

لننقر وترَ القيثارة عند منتصفه، ويُفضَّل أن نفعل ذلك بإبهامنا وليس بريشة قيثارٍ حادّة. يسبّب هذا النقرُ إثارةَ **نمط الاهتزاز الأخفض** للوتر الذي يوافق الحالة الحركية ذات الطاقة الكمومية الأخفض للإلكترون المُحتَجَز في الخندق. نرى من الشكل 23 أنّ الطول الموجي في هذا النمط هو $l=2L$ (الحرف اليوناني لامبدا، ونلفظه «لامْ ـ دَه»)، وبالتالي يبلغ طولُ الوتر **نصفَ** كاملِ الطول الموجي (أي إن هناك ذروةً واحدة أو غوراً واحداً في المكان الذي يكون فيه الاهتزاز على أشدّه، بينما يحتوي طولٌ موجيّ كامل على ذروةٍ وغورٍ معاً). يمثّل هذا الوضعُ **النمطَ الأخفض** أو **المستوى الطاقي الأخفض**

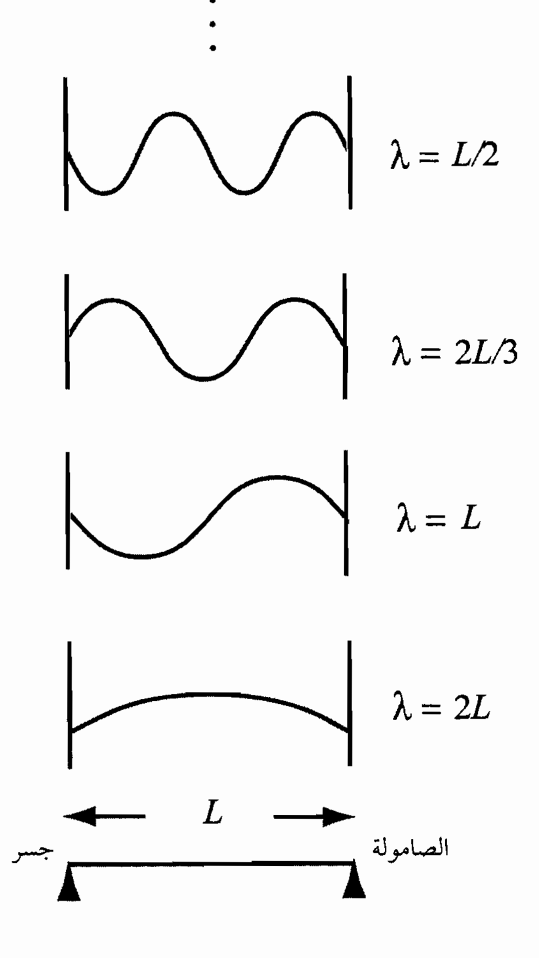
(*) مشط العود أو الكمان: القطعة الرافعة للأوتار.

(**) العزقة الطرفية التي يُمرَّر الوتر حولها عند أعلى ذراع الآلة الوترية.

أو **الحالةَ الأرضيّة الأساسية** للمنظومة يشكلٍ يوافق العلامةَ الموسيقية الأخفض التي يمكن لوتر القيثارة إصدارها. تظهر هيئةُ الموجة هذه في الشكل 23.

لنتناول الآن **النمط الثاني** من اهتزازات وتر القيثارة. يبلغ الطول الموجي لهذا النمط l = L، ويعني هذا وجود ذروة وغور خلال المسافة الإجمالية للوتر l = L كما هو واضح في الشكل 23. في الحقيقة يمكنك إثارةُ هذا الاهتزاز من النمط الثاني في وترِ قيثارةٍ حقيقية مع قليلٍ من الصبر من خلال وضعِ إصبع لك على الوتر في منتصفه والنقرِ بالإبهام على منتصف المسافةَ بين الإصبع السابق وبين المشط ثمّ رفع الإصبع الموضوع بسرعة. يضمن وضعُك لإصبعك عدمَ خضوع منتصف الوتر لأيّ اهتزاز، وهذه ميزة نراها محققة في النمط الثاني للاهتزاز (تُدعى مثلُ هذه النقاط الثابتة بـ**عقد** التابع الموجي). يُصدر هذا الاهتزازُ نغمةً ملائكيةً عذبةً شبيهةً بصوت آلة الهارب توافق جواباً موسيقياً يعلو النمطَ الأخفض بثماني علامات(*). بما أنّ الطول الموجي في النمط الثاني أقصر منه في النمط الأخفض، فإنّ الجسيم الكمومي في الحركة الموافقة للنمط الثاني يمتلك اندفاعاً ـ وبالتالي طاقةً ـ أكبرَ منه في النمط الأخفض. إذا أسقطنا فوتوناً على إلكتروننا، وافترضنا أنّ له المقدارَ المناسب تماماً من الطاقة، فإننا نستطيع زيادةَ سرعة الإلكترون وبالتالي جعله يقفز نحو النمط الثاني، أي ما يُدعى بـ**الحالة الكمومية المُثارة الأولى** للمنظومة. بشكلٍ مشابه، يمكن للإلكترون أن يُشعّ فوتوناً، ويثب عائداً من حالته المثارة هذه إلى حالته الأرضية (الأساسية).

(*) «أوكتاف» واحد حسب التعابير الموسيقية.



الشكل 23: يمثّل وترُ القيثارة إلكتروناً محتَجَزاً ضمن بئرٍ كمومي موجودٍ مثلاً في جزيء عضويٍ طويل كجزيء بيتا ـ الجزرين. يطابق شكلُ اهتزاز وترِ القيثارة من أجل كلّ علامة موسيقية مسموحة تُصدرها القيثارة شكلَ تابعٍ موجي للإلكترون. تتزايد طاقة الإلكترون مع قصر طوله الموجي. يمكن للإلكترونِ أن يقوم بانتقالات أو وثبات بين حالات الحركة المختلفة مصدراً ضوءاً بطاقةٍ محدّدة، مساوية للاختلاف الطاقي بين مستويَين طاقيَّين.

يوافق المستوى الطاقي التالي في العلو النمطَ الثالث من اهتزازات وتر القيثارة، الذي يحوي طوله هنا $1\frac{1}{2}$ موجةً كاملة، ويعني هذا أنه لدينا الآن $l = 2L/3$. يمكنك توليدُ هذا النمط في وتر القيثارة عبر وضع الإصبع عند نقطةٍ من الوتر تبعد عن الحَزَقة مسافةً مساويةً لثلث طول الوتر، ثم يتمّ نقر الوتر عند منتصف المسافة بين المشط والإصبع الموضوع الذي يجب رفعه بسرعة بعدها. سيؤدي ذلك إلى أن نسمع صوتاً رقيقاً جداً لعلامةٍ موسيقية «ملائكية» خماسية النغمة (إذا «دَوْزَنْت» وتر القيثارة على علامة الدو كانت هذه العلامة موافقةً للصول في المقام الثاني الأعلى من الدو). لهذا النمط من الاهتزاز طولٌ موجي أكثر قصراً، وبالتالي يكون اندفاعُه أكبر وطاقته كذلك[11]. ومرةً أخرى نجد أنّه إذا صدم فوتونٌ إلكتروناً وكان

---

(11) توجد في الواقع نقطة تقنية ماكرة هنا. فما نعنيه فعلاً من الجملة المذكورة في النصّ هو **سعة** (طويلة) الاندفاع، لأنّ حالة الموجة المُحتجَزة لا تتّصف بقيمة محدّدة للاندفاع بخلاف حالة الموجة المنتشرة (بلغة ميكانيك الكمّ تكون الموجة المستوية المنتشرة حالةً ذاتيةً لمؤثّر الاندفاع، بينما لا تكون كذلك الموجةُ المقيّدة). يكون للموجات المستقرّة لوتر القيثارة في أيّ لحظة قيمتان للاندفاع واحدة موجبة والأخرى سالبة، ولكنها ـ عدا ذلك ـ تكون ذات سعةٍ (طويلةٍ) واحدة مشتركة ومحدّدة تماماً للاندفاع [أي إنّ قيمتَي الاندفاع متعاكستان في الإشارة، ولكنهما متساويتان في القيمة المطلقة]. إنّ التابعَ الموجي للنمط الأكثر انخفاضاً يمثّله بالضبط شكلُ وتر القيثارة المهتزّ في المكان وهو يتذبذب عبر الزمان، ومن الناحية الرياضياتية يُعبَّر عن شكل النمط الأكثر انخفاضاً بالتابع الرياضياتي $\sin(\pi x/L)$. وبما أنّ الشكل الصحيح للتابع الموجي الفعلي يجب أن يتضمّن أعداداً عقدية، فإنه يمكن كتابته كما يلي: $\varphi(x, t) = A\sin(\pi x/L)\, e^{iwt}$، حيث $w = 2\pi/h$. يكون احتمال إيجاد الإلكترون في $x = 0$ و$x = L$ عند الموضع x إذاً مساوياً لـ $|\varphi(x,t)|^2 = A^2 \sin^2(\pi x / L)$. في الحقيقة وبما أنّ احتمال إيجاد الإلكترون في مكانٍ ما من المجال $0 \leqslant x \leqslant L$ مساوٍ للواحد، فإننا نجد أنّ $A = \sqrt{2/L}$.

[تقنياً يبلغ احتمال وجود الإلكترون في المجال الصغير $[x - dx/2, x + dx/2]$ القيمة $|\varphi(x,t)|^2 dx = A^2 \sin^2(\pi x / L)dx$، وبالتالي يكون احتمال وجود الإلكترون في اللحظة t في مكانٍ ما بين $x = 0$ و$x = L$ مساوياً لـ: $\int_{x=0}^{x=L} |\varphi(x,t)|^2 dx = \int_{x=0}^{x=L} A^2 \sin^2(\pi x / L)dx = A^2 L/2$، وبالتالي $A^2 L / 2 = 1$].

له المقدارُ المناسب من الطاقة، فإنّ الإلكترون المصدوم يمكن أن يتسرّع وينتقل إلى هذا النمط الاهتزازي الثالث من ضمن الحالات المُثارة. كذلك يمكن لإلكترونٍ موجودٍ في النمط الثالث أن يُشِعّ فوتوناً، ويقفز إلى مستويات طاقية أخفض.

نستطيع عبر تطبيقِ طاقاتٍ أكبر وتزويدها للإلكترون أن نصل به إلى مستوى الطاقة الرابع والخامس والسادس وغيرها من المستويات الطاقية الأعلى التي يوافقُ كلّ منها نمطاً أكثر فأكثر علواً من الاهتزاز لوتر القيثارة. وفي آخر المطاف سوف يكتسب الإلكترون مقداراً من الطاقة يكفيه ليفلتَ من حقل الكمون ويغدو جسيماً حرّاً (ويصير تابعه الموجي موجةً منتشرة تبتعد عن مسرح الأحداث)، فنقول عندها إنّ المنظومة قد **تأيّنت**.

هناك الكثير من المنظومات الفيزيائية التي تسلك تماماً مسلكَ مثالنا عن الإلكترون المقيَّد في خندقٍ وحيد البعد. تكون الإلكتروناتُ الواقعةُ في المدارات الخارجية الأبعد لذرّات الكربون في الجزيئات العضوية طويلة الشكل مثل جزيء بيتا ـ الجزَرين(*) (Beta-Carotene) (وهو الجزيء المسؤول عن إعطاء اللون البرتقالي للجزر) مخلخلة وغيرَ مرتبطة بإحكام، فتذهب في مداراتها إلى أقاصي أطراف الجزيء، مثل حال الإلكترونات في خندق طويل. يتّسع طولُ الجزيء إلى عدة أقطار ذرّية، بينما يبلغ عرضه قطراً ذرّياً واحداً لا غير. إنّ شكلَ هذا الجزيء مماثلٌ تماماً لبئرنا الكمومي وحيد البعد، فهو بمثابة خندق عميق تتحرّك الإلكترونات في أرجائه. تمتلك الفوتونات الصادرة

(*) بيتا ـ الكاروتين أو الجزَرين: مركَب عضوي صيغته الإجمالية $C_{40}H_{56}$ بحلقتَي B عند نهايتَيه، وهو صباغٌ برتقالي وأحمر يوجد في كثيرٍ من النباتات وفي بعض الأنسجة الشحمية لبعض الحيوانات، وهو مكوّنٌ أساسي في فيتامين آ.

عن الجزيء ـ عندما تقفز إلكتروناته من حالة كمومية إلى أخرى ـ طاقاتٍ متقطّعة موافقة للفروق بين اثنين من مستويات الطاقة. من أجل الجزيئات متطاولة الشكل ذات القيمة الكبيرة لـ L، توافق الفوتوناتُ الصادرةُ الضوءَ الأحمر والأشعةَ تحت الحمراء. يسمح إذاً قياسُ طيف الفوتونات الصادرة من جزيئات عضوية مماثلة في المخبر بتحديد طول الجزيء L وحتى باستنتاج بنيته.

بشكل عام لا تستطيع الجسيماتُ المقيَّدة ـ مثل الإلكترونات في الذرّة ـ أن تقفز إلاّ بين المستويات المتقطّعة التي تمثّل حالاتٍ مكمَّمة للحركة، وبالتالي يمكن للذرّات أن تُشعّ أو تمتصّ فوتونات بطاقاتٍ متقطّعة محدّدة. نستطيع أن نلاحظ هذه الخطوط الطيفية المتقطّعة من خلال **مطيافٍ** بسيط يمكن صنعه في المنزل[12]. نرى

(12) يمكن بناء مطياف خلال نصف ساعة بواسطة صندوق أحذية كرتوني وشبكة انعراج للنظر من خلالها (وهي شبكةٌ بلاستيكية يمكن الحصول عليها بدولار واحد من مخزن الأدوات العلمية أو أيّ حانوتٍ جيّد لبيع أدوات الهواة، وأغلب معلّمي العلوم في المدارس يمتلكون المئات منها ويخبّئونها في تلك الخزانة السرّيّة الموجودة في مؤخّرة قاعة صفّ الكيمياء أو الفيزياء) إضافةً إلى رقاقة معدنية صغيرة. نُحدِث شقّاً ضيّقاً في الرقاقة المعدنية ـ باستخدام شفرة موس الحلاقة أو سكّين للهواة ـ كي نستقبل الضوء من خلالها في أحد أطراف الصندوق. وفي الطرف المقابل من الصندوق نفتح ثقباً يمكن النظر عبره ونلصق عليه شبكة الانعراج. نغلق الآن الصندوق بحيث يكون ما نراه من داخله عند هذه المرحلة معتماً تماماً. إذا قمنا بتوجيه شقّ الرقاقة إلى مصباحٍ ضوئي لبخار الصوديوم من النوع الذي ينير الشوارع، ونظرنا إلى جوف الصندوق عبر الثقب المُلصَقة عليه شبكة الانعراج، فإننا نرى الشقّ ونرى كذلك إلى جانبه صوراً أو نسخاً عديدة من هذا الشقّ وهي ملوَّنة بألوان قوس قزح. إنّ ما نراه يمثّل الطيفَ الممتدّ للضوء المعني، حيث تظهر فيه الخطوط الطيفية المتقطّعة للفوتونات الصادرة عن إلكترونات بخار الصوديوم. لنكرر الآن ما فعلناه مع هدفٍ أكثر عظمةً ألا وهو قرص الشمس. نوجّه الشقّ **وبحذرٍ** إلى الشمس، فنرى ـ عبر النظر من خلال شبكة الانعراج مرّة أخرى ـ صوراً جانبية للشقّ مشكّلةً طيفاً مستمراً للضوء بألوان قوس قزح (يجب الانتباه هنا من أجل السلامة الصحية إلى ضرورة عدم النظر مباشرةً إلى قرص الشمس). إذا ما تأمّلنا الطيف المستمر بتعمّقٍ أكثر، فسوف نرى خطوطاً =

هنا أيضاً أنّ الإلكترون حتى لو كان في حالته الأرضية (الأساسية) ـ بخلاف كرة التنس التقليدية (الكلاسيكية) ـ لا يكون في حالة سكون، فله طول موجي منته محدود وبالتالي تكون قيمتا اندفاعه وطاقته الحركية غيرَ معدومتَين. تُدعى حركةُ هذه الحالة الأرضية (الأساسية) بـ**حركة نقطة الصفر**، وهي تحدث في جميع المنظومات الكمومية. يكون إلكترون ذرة الهيدروجين ـ وهو في الحالة الموافقة للطاقة الأصغرية الممكنة ـ متحرّكاً وليس ساكناً. عندما نتحدّث عن درجة حرارة **الصفر المطلق**، فإننا نعني في الحقيقة درجةَ حرارةٍ يكون فيها كلّ شيءٍ في حالته الأرضية (الأساسية) ـ وليس في حالةٌ سكون وانعدام حركة ـ لأنّ ميكانيك الكمّ يفرض على الأشياء ـ حتى في حالاتها الأساسية ـ أن تبقى في حالة حركةٍ دائمة. ربّما يُعتبر هذا الأمرُ نصراً للجهود الطائلة التي بذلها كثيرون من الذين حاولوا صنع آلةِ دائمةِ الحركة، فالطبيعة بفضل ميكانيك الكمّ **هي** محرّكٌ دائمُ الحركة. ومع ذلك تبقى مصونيةُ الطاقة ونظريةُ نوثر صالحتَين، ولن تحقِّقَ شركةُ الأوج أيَّ نجاحٍ في النظام الكمومي بل سيكون مصيرُها الفشلَ كما كان في العالَم النيوتني.

تسلك حركةُ **أيِّ** جسيم متموضع ـ أي مُحتجَز ومُقيَّد ضمن حقل كموني ـ مسلكَ الموجات المقيَّدة لوتر قيثارة، وسيوافقها مستوياتٌ طاقية مكمَّمة لا تأخذ إلاّ قيماً مسموحةً محدّدة ومتقطّعة. ينطبق هذا الأمر على الإلكترونات المحصورة في الذرّات وعلى البروتونات والنترونات المقيَّدة في النوى الذرّيّة بالإضافة إلى الكواركات المحتجَزة

= عاتمة ضمن ألوان قوس قزح، وهي تمثّل خطوط امتصاص الفوتونات الخاصة بغاز الهيدروجين الموجود في الهالة الكروية (الكوروناسفير) للشمس. لقد تمّ اكتشاف هذه الظاهرة في منتصف القرن التاسع عشر، فأذهلت وصعقت الفيزيائيين تماماً، وظلّ هذا حالهم إلى أن ابتُكِرَت النظرية الكمومية.

ضمن البروتونات والنترونات. في حالة الكواركات المحتجَزة ضمن الجسيمات، تظهر لنا مستوياتُ الطاقة الممثِّلة للحالات المُثارة في الحقيقة كجسيمات جديدة! وأخيراً ليست **نظرية الأوتار** إلاّ نسخةً متألِّقةً ولمّاعةً نسبوياً من وتر القيثارة. يكمن الأملُ هنا بتفسير الكواركات نفسها (والجسيمات الأخرى الأساسية فعلاً في الطبيعة) كاهتزازاتٍ كمومية للوتر. يمكن لنا سماعُ مثل هذه الموسيقى الجميلة من تلك القيثارة القديمة، إذا ما تمرّن عازفُها بشكل جيّد.

الاندفاع الزاوي المداري والتدويمي (السبيني) في ميكانيك الكمّ

يعبّر الاندفاع الزاوي عن القياس الفيزيائي للحركة الدورانية لمنظومةٍ أو كائنٍ ما، فهو الكمية الفيزيائية المصونة الناجمة ـ وفقاً لنظرية نوثر ـ عن التناظر الدوراني. يخضع أيضاً الاندفاعُ الزاوي ـ الذي كان في الفيزياء النيوتنية مقداراً فيزيائياً يتغيّر باستمرار ـ إلى تبديلٍ جذريّ وعنيفٍ في صفاته وميّزاته في ميكانيك الكمّ، فهو بدوره يغدو «رقمياً» متقطّعاً أو مُكمَّماً.

لنتأمّل جيروسكوباً تقليدياً (كلاسيكياً) في حركةٍ تدويمية، سنجد أنّ له تدويماً (سبيناً) حيث إنه يدور حول نفسه. في الفيزياء التقليدية يمكن ظاهرياً لاندفاعِ الجيروسكوب الزاوي التدويمي (السبيني) أن يأخذَ أيّ قيمة نريدها. ولكن متى ما جعلنا الجيروسكوب يصغر أكثر فأكثر، فإننا في نهاية المطاف سنجد أنّ قيمة الاندفاع الزاوي ليست عدداً كيفياً اعتباطياً (مثل العدد الوسطي للأطفال في العائلة)، بل بالأحرى يأخذ الاندفاع الزاوي قيماً متقطّعة (مثل العدد الحقيقي للأطفال في العائلة)، فالاندفاع الزاوي **مُكمَّمٌ دوماً** في ميكانيك الكمّ. يظهر في آخر الأمر أنّ جميع القيم المُلاحَظة للاندفاع الزاوي هي مضاعفاتٌ متقطّعة من ثابت بلانك مقسوماً على 2π، أو ما يُدعى

بـ «إتش ـ بار» $\hbar = h/2\pi$. جميع حالات الحركة المدارية والتدويمية (السبينية) التي نراها في الطبيعة لها اندفاعاتٌ زاوية لا تأخذ إلاّ إحدى القيم التالية تماماً:

$$0, \frac{\hbar}{2}, \hbar, \frac{3\hbar}{2}, 2\hbar, \frac{5\hbar}{2}, 3\hbar,$$

... إلخ. وهكذا يكون الاندفاع الزاوي في الطبيعة إمّا مضاعفاً **صحيحاً** أو مضاعفاً **نصفَ صحيح**(*) من الثابت $\hbar$.

الآن ماذا يخبرنا ذلك كلّه عن الاندفاع الزاوي لدوران الأرض حول نفسها؟ عمليا: لا شيء. إنّ الاندفاعَ الزاوي للأرض كبيرٌ جداً مقارنةً مع ثابت بلانك، بحيث إنه لن يمكننا أبداً الإجابةُ عن هذا السؤال(**) بأيِّ دقّة تجعله ذا معنى. كذلك فإنّ الإجابةَ معقّدة جداً لأنّ الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) الكلّي للأرض ليس قيمةً دقيقةً لتدويم (سبين) كمومي، فالأرض منظومة ضخمة مؤلَّفة من عددٍ هائلٍ من الذرّات في تفاعل دائم مع ما يُحيطها. من منظور القياس على المستوى الكمومي، لا يمكن تحديد قيمة الاندفاع الزاوي للأرض بدقّة. هذا الأمرُ ليس شبيهاً البتة بحالة الاندفاع الزاوي المستقرّ والدائم لإلكترون صغيرٍ منفرد، ونحن لا نلاحظ تكميمَ الاندفاع الزاوي إلاّ على مستوى المنظومات بالغة الصغر من أمثال الذرّات أو الجسيمات الأولية نفسها.

بمعنى من المعاني، ينجم تكميمُ الاندفاع الزاوي هذا لأنّ الحركة الدورانية محدودة ـ كحالة الإلكترون المحتجَز في بئرٍ كمومي طويل ـ فأقصى دورانٍ نستطيعه بالنسبة إلى منظومة ما هو بزاوية 360°

(*) أي عدداً صحيحاً مفرداً مقسوماً على 2.

(**) السؤال عن وجوب أخذ شرط تكميم الاندفاع الزاوي في الاعتبار عند قياس قيمة الاندفاع الزاوي «الكلاسيكي» للأرض.

(أو 2d راديان)، وعندها تعود المنظومة لحالتها التي ابتدأنا منها. وهذا هو تماماً التناظر الدوراني للمكان، ويجب على الجسيم أن «يعيش» ضمن فضاء زاوي محدود، حيث تغطّي الزاويةُ القيمَ من 0 إلى 360 درجة (أو 2d راديان). وهكذا كما يصبح اندفاعُ الإلكترون المُقيَّد ضمن كمونٍ له حدود مكمَّماً (وبالتالي طاقتُه أيضاً التي هي مرتبطة مباشرةً بالاندفاع)، فإنّ المقدارَ المماثل ـ الاندفاع الزاوي ـ يكون أيضاً مكمَّماً بسبب الطبيعة المحدودة للدورانات.

إنّ الاندفاع الزاوي هو خاصية ذاتية ومتأصّلة في طبيعة الجسيم الأولي أو الذرة، فجميع الجسيمات الأولية هي جيروسكوبات صغيرة تمتلك اندفاعاً زاويا تدويمياً (سبينياً). لن نستطيع إطلاقاً إبطاءَ دوران الإلكترون وجعله يوقف تدويمَه، بل ستبقى له دوماً قيمةٌ محدَّدة للاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) وهي ـ كما يتبيّن في نهاية المطاف ـ مساويةٌ (بالقيمة المطلقة) تماماً لـِ $\hbar/2$. يمكننا أن نقلب مثل هذا الإلكترون رأساً على عقب، وعندها سنرى أنّ اندفاعَه الزاوي يتّجه إلى الاتجاه المعاكس، أي إنّ قيمته الآن هي $\hbar/2$. يمثّل هذان المقداران القيمتَين الوحيدتَين المُلاحَظتَين لتدويم (سبين) الإلكترون. ونقول إنّ الإلكترون هو جسيمٌ بتدويم (سبين) ـ 1/2 لأن قيمةَ اندفاعه الزاوي هي $\hbar/2$(*).

تُدعى الجسيمات ذات الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) المساوي لـ**مضاعفِ نصفِ صحيح** من $\hbar$ ـ أي بقيم:

$$\frac{\hbar}{2}, \frac{3\hbar}{2}, \frac{5\hbar}{2},$$

(*) للدقة العلمية يجب توضيح أنّ الفقرة هذه تناقشُ مسقطَ الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) على محورٍ ما، إذ يعطي قياسُه إحدى القيمتَين $\pm\frac{\hbar}{2}$. بينما يعطي قياسُ طويلة الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) للإلكترون القيمة $\frac{\sqrt{3}}{2}\hbar$.

وهكذا دواليك ـ بـ**الفرميونات** تيمّناً بالفيزيائي المرموق إنريكو فيرمي (Enrico Fermi) الذي كان رائداً في إيضاح هذه المفاهيم. الفرميونات التي تعنينا هنا هي الإلكترون والبروتون والنترون (وسنرى بعضها الآخر في ما بعد، مثل الكواركات التي تكوّن البروتون والنترون. .. إلخ)، وكلّ منها له اندفاع زاوي بقيمة $\hbar/2$، فنقول عن هذه الجسيمات كلّها بأنها **فرميونات بتدويم (سبين) ـ** 1/2.

من ناحية أخرى تُدعى الجسيمات ذات الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) المساوي لـ**مضاعفٍ صحيح** من $\hbar$ ـ أي مثل $0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar$ وهكذا ـ بـ**البوزونات** نسبةً إلى الفيزيائي الهندي الشهير ساتييندرا ناث بوز (Satyendra Nath Bose)، وهو رفيقٌ لإينشتاين الذي ساهم أيضاً في تطوير بعضِ هذه الأفكار. هناك اختلافٌ كبير بين الفرميونات والبوزونات سنتعرّض له مؤقّتاً. على نحوٍ نموذجي الجسيمات البوزونية الوحيدة التي ستهمّنا في الوقت الراهن هي جسيمات شبيهة بالفوتون (تُدعى بـ «بوزونات المعيار») ولها تدويم (سبين) ـ 1 (أي قيمة $\hbar$ واحدة للاندفاع الزاوي)؛ ثم جسيم الثقالة ويُسمّى بالغرافيتون (الجذبون) وهو لم يُكتَشف بعد في المخبر وله تدويم (سبين) ـ 2 (أي قيمة $2\hbar$ للاندفاع الزاوي)؛ ثم الجسيمات المدعّوة بالميزونات ولها تدويم (سبين) ـ 0 (أي قيمة 0 للاندفاع الزاوي). يكون للاندفاع الزاوي (المداري) في جميعِ الحركات المدارية في النظرية الكمومية قيمٌ صحيحة من $\hbar$ مثلَ $0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar$، وهكذا.

تناظر الجسيمات المتطابقة

يوجد كثيرٌ من المنظومات الفيزيائية الكبيرة ـ سواء في الكون أو حتى في منزل أيّ شخصٍ منّا ـ يخضع لميكانيك الكمّ بطرقٍ مرئيةٍ

للغاية. لا تكون الآثارُ الكمومية الدقيقة والحذقة في مثل هذه المنظومات الخاصة مخفيةً، ولا يتمّ «تعديلها بالصفر» من خلال عملية أخذ المتوسّط.

تُدعى إحدى أهمّ وأمتع هذه الظواهر العيانية الغريبة باسم **السيولة الفائقة**. يقدّم الهليومُ السائل المبرَّد لدرجاتٍ بالغة الانخفاض مثالاً عن سائلٍ فائق (في الحقيقة على الهليوم هنا أن يكون النظيرَ ^{4}He، وأن يتمّ تبريده إلى حوالي درجةٍ واحدةٍ فوق الصفر المطلق). إذا وضعنا سائلاً فائقاً في كأسٍ فوق طاولة، فإنه سيبدو مثلَ أيّ سائلٍ عادي كالماء مثلاً. ولكن ـ بخلاف الماء ـ إذا قمتَ بسكب كأسٍ من الهليوم السائل، فإنك سترى أنّ مجمل كيان السائل في طرفٍ من دورق سيزحف نحو الأعلى ليهبط في الطرف الآخر، ثم يختفي مع تبخّره على الأرض. يمكنك صنعُ نافورة تتحرّك وحدها من دون مضخّة بواسطة سائل فائق. إذا وضعتَ أنبوباً مفتوح الطرفين في فنجانٍ من سائل فائق، فإنّ السائل سيصعد في الأنبوب للأعلى ثم يسقط نحو الدورق وتُعاد الكرّة إلى الأبد. لا ينتهكُ هذا الأمر نظريةَ نوثر ولا مصونية الطاقة، لأنه ليس هناك فقدانٌ صافٍ للطاقة التي تظلّ مصونة. إننا لا نفكّر هنا بطريقة يمكن معها بعثُ شركة الأوج من جديد، لأننا لا نستطيع خلقَ فائضٍ طاقيّ بهذه الطريقة. إنّ سائلَنا سائلٌ «فائق» من حيث إنه **لا توجد أيّ مقاومة لجريانه ولتدفّقه** كسائل. إنّ الأمر يجري كما لو أنّ مجملَ كيان السائل قد غدا كائناً واحداً جماعياً (يشمله كلّه) في حالةِ حركةٍ مشترَكةٍ لا احتكاك فيها، حيث تتحرّك جميعُ ذرّات السائل معاً في تناغم وبالطريقة نفسها تماماً، مثل سربٍ كبيرٍ من الأوز الطائر! في الحقيقة هذا ما يحدث فعلاً: تتحرّك جميع الذرّات معاً في حالةٍ حركيةٍ واحدة، ويمثّل هذا أثراً ميكانيكياً كمومياً غريباً وشبحيّاً يُدعى عادةً باسم **الحالة المتماسكة**.

لم يجد أحدٌ حتى الآن لاستخدام السوائل الفائقة تطبيقاً تجارياً يمكن تسويقه، ولكنّ نظماً كمومية ذات صلة بها ـ من حيث استخدامها للحالات المتماسكة ـ موجودةٌ في الوقت الراهن في استعمالات الحياة اليومية وفي منازلنا. على سبيل المثال، يولّد الليزرُ حالةً متماسكة للضوء، فهو حزمةٌ شديدة من الضوء تتحرّك فيها جميع الفوتونات ـ جسيمات الضوء ـ معاً تماماً في بنيانٍ مرصوصٍ كما لو كانت نوعاً من سائلٍ فائق فوتوني. إنّ الفوتونات جسيماتٌ وفي الوقت نفسه موجات (أي هي كائنات جسيمية ـ موجية ميكانيكية كمومية) تفعل ما يأمرها به ميكانيكُ الكمّ. تُعَدّ الليزرات أساسَ أجهزةٍ من أمثال قوارِئ الاسطوانات المدمجة (CD) أو اسطوانات الفيديو الرقمية (DVD)، حيث يتمّ خزن كميات كبيرة من المعطيات ضمن وسطٍ ضوئي كثيف تتمّ «قراءتُه» بواسطة حزمة الليزر. تؤدي الليزرات دوراً متزايدَ الأهمية في الاتصالات من خلال نقلها لإشارات ضوئية عبر أليافٍ زجاجية. يدلّ كلُّ هذا على بلوغِ علم «البصريات الكمومية» مرحلة النضج من حيث مساهمته في رفع مستوى المعيشة ومشاركته بقسمٍ معتبَرٍ من الدخل القومي العام.

هناك مثالٌ آخرُ لافتٌ للنظر أيضاً عن أثرِ كمومي عياني يتجلّى عند المقاييس الكبيرة وهو **الناقل الفائق** الكهربائي. يكون هذا الناقل عادة مجرّد ناقلٍ معدني ردىء للكهرباء في درجة حرارة الحجرة، مثل خليطة الرصاص (ورمزه الذرّي Pb) أو النيكل (Ni). ومع ذلك عندما تبرد النواقلُ الفائقة لتبلغَ بضع درجات فقط فوق الصفر المطلق (وهي أخفض درجةِ حرارةٍ يمكن الوصول إليها، وفيها يكون أيُّ جسيم كمومي في حالته الموافقة لأخفض طاقةٍ ممكنة)، فإنه يمكن إمرارُ تيّارٍ كهربائي عبرها بحيث يتدفّق ضمن حالةٍ كمومية متماسكة. وكحالة السائل الفائق لا توجد هنا أيّ مقاومةٍ لمرور التيار. في

الحقيقة تُستَعمل المغانطُ التي تستخدم أسلاكاً فائقةَ الناقلية على نطاقٍ واسع في أجهزة التصوير الطبية، مع العلم أنه قد تمّ ابتكارُ مثل هذه المغانط فائقة الناقلية في الأساس من أجل المسرّعات الضخمة للجسيمات، ومنها على وجه الخصوص آلة التيفاترون في مخبر الفيرميلاب. في السنوات الأخيرة الماضية اكتشف الفيزيائيون بعضَ النواقل الفائقة بـ «درجاتِ حرارةٍ عالية»، يمكن أن تعملَ وتغدو ناقليتُها فائقةً عند درجةِ حرارةٍ (عالية نسبياً) تعلو الصفر المطلق بعشرات الدرجات. يُتوقَّع لهذه المواد أن يكون لها أثرٌ كبير على حياتنا اليومية في المستقبل، كأن يأتيَ يومٌ نزيل فيه كلّ الخطوط قبيحة الشكل المخصّصة للنقل الكهربائي عالي التوتّر لنستبدلَ بها كابلاتٍ صغيرة تحت الأرض لنواقلَ فائقةٍ ذات درجاتِ حرارةٍ ليست منخفضة. وعندما ستدخل مثل هذه الأفكار حيّزَ التنفيذ، وتُوضَع ـ يوماً ما ـ هذه الكابلات تحت الخدمة، لن يكون هناك أيُّ ضياعٍ عند نقل الطاقة الكهربائية من محطة التوليد الكهربائي إلى المستهلِك.

تنجم هذه الآثارُ العيانية الغريبة عن تناظرٍ ذي أهمية قصوى في صياغة العالَم الفيزيائي: إنه **التناظر بين الجسيمات المتطابقة في ميكانيك الكمّ**، ونعني به الطريقةَ الغريبة التي يعامل بها ميكانيكُ الكمّ الجسيماتِ الأساسيةَ التي تكون أوليةً لدرجة أنها لا تمتلك أيَّ نمشٍ أو ثؤلولٍ أو أيَّ علامة تعرّفها، وبالتالي تكون غيرَ قابلة للتمييز إطلاقاً في ما بينها. تخصّ هذه الآثارُ العيانيةُ الخاصةُ ـ المذكورة أعلاه ـ صفَّ الجسيمات التي عرّفناها بأنها **بوزونات** (جسيمات بتدويم ـ سبين صحيح). من الأمور الأساسية هنا أنه يمكننا أن نضع المقدارَ التي نريده من البوزونات المتطابقة في حالة الحركة الكمومية نفسها (وهي مغرمَةٌ بذلك). إنّ الفوتونات وذرّات ^{4}He هي بوزونات.

نستطيع الآن ـ باستخدام لغة التابع الموجي لشرودينغر ـ أن

نفهم أصلَ هذه الآثار على أنها ناجمة عن التناظر. لنأخذ منظومةً فيزيائية تحتوي على جسيمَين. على سبيل المثال، يمكن لهذه المنظومة أن تكون ذرّة هليوم محتوية على إلكترونين يدوران حول نواتها، أو أن تكون خندقَنا الكمونيَّ المحتويَ على جسيمَين متطابقَين. في الحالة العامة، نَصِف المنظومةَ المؤلَّفة من جسيمَين من خلال إعطاء تابع الموجة الميكانيكي الكمومي، الذي يعتمد الآن على الموضعَين المختلفَين للجسيمَين $\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t)$. مرة أخرى ـ وفقاً لتفسير ماكس بورن (المسبِّب لعذابِ إينشتاين) ـ يعبّر مربّعُ القيمة المطلقة (الطويلة) للتابع الموجي $|\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t)|^2$ عن احتمال إيجاد جسيمَينا في الموضعَين $\vec{x_1}$ و$\vec{x_2}$ من المكان عند اللحظة t.

لنتناول الآن فعلَ **تبديل** أحد الجسيمَين بالجسيم الآخر. بعبارةٍ أخرى نعيد ترتيبَ منظومتنا من خلال مبادلة الموقعَين $\vec{x_1} \longleftrightarrow \vec{x_2}$. وهكذا توصَف المنظومةُ الجديدة «المُبادَلة» بالتابع الموجي $\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t)$ حيث بادلنا ببساطة بين موضعَي الجسيمَين. ولكن هل ما نحصل عليه هنا هو فعلاً منظومةٌ جديدة أم المنظومةُ نفسُها التي ابتدأنا بها؟ بعبارةٍ أخرى هل التابعُ الموجي الجديد يصف منظومةً جديدة «مبادَلة» أم أنّه يصف منظومتنا الأصلية نفسها؟

إنّ عدد أفراد فئة أو طائفة الأشياء التي نلاقيها في حياتنا اليومية والمُسمّاة بِـ «الكلاب» هو عددٌ كبيرٌ جداً، ورغم ذلك لن يوجد كلبان متطابقان تماماً، حتى لو انتميا كلاهما إلى الفئة الجزئية نفسها (السلالة)، كأن يكونا مثلاً كلاهما بودل(*). إذا وضعنا بودل في بيت الكلب رقم 1 وترير(**) في بيت الكلب رقم 2، فإنّ منظومتنا هذه

(*) البودل (Poodle): كلب ذكي أجعد الشعر.

(**) الترير (Terrier): كلب صغير نشيط من كلاب الصيد.

مختلفة عمّا تكون عليه لو وضعنا البودل في بيت الكلب 2 والتِّرْير في بيت الكلب 1. بخلاف ذلك إنّ جميع الإلكترونات متطابقة تماماً في ما بينها، فهي لا تحمل إلاّ مقداراً محدوداً من المعلومات. أيُّ إلكترون جديد حصلنا عليه للتوّ من مصنع الإلكترونات متطابقٌ **تماماً** مع أيّ إلكترونٍ آخر، والأمر نفسه ينطبق على جميع الجسيمات الأولية. لذلك يجب على أيّ منظومة فيزيائية أن تكون متناظرة ـ أو صامدةً لا تتغيّر ـ عند تبديل أحد هذه الجسيمات بغيره منها. يمثّل التبادلُ بين الجسيمات المتطابقة في التابع الموجي **تناظراً أساسياً في الطبيعة**. بمعنى من المعاني إنّ الطبيعةَ بسيطةٌ ومغفَّلةٌ جداً في ما يخصّ الطريقةَ التي تُعامل بها الإلكتروناتِ، بحيث إنها لا تعرف الاختلافَ بين أيّ إلكترونَين (أو أكثر) في الكون كلّه.

يجب ألاّ يغيّر «تناظرُ التبادل» هذا في التابع الموجي قوانينَ الفيزياء، لأنّ الجسيمات التي يؤثّر عليها متطابقة. يقتضي هذا الأمرُ على المستوى الكمومي أن يعطيَ تابعُنا الموجي المُبادَل قيمةً للاحتمالية الملاحَظة مساويةً لقيمتها الأصلية: $|\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t)|^2 = |\psi(\vec{x_2}, \vec{x_1}, t)|^2$. ولكن هذا الشرط يقتضي حلَّين رياضيّاتيَّين ممكنَين لأثر تطبيق التبديل على التابع الموجي:

إمّا $\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t) = \psi(\vec{x_2}, \vec{x_1}, t)$ أو $\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t) = -\psi(\vec{x_2}, \vec{x_1}, t)$

مّما يعني أننا نلاحظ أنّ التابعَ الموجي بعد تبديل موقعَي الجسيمَين يمكن من حيث المبدأ أن يكون إمّا **متناظراً** (أي 1+ مضروباً بالتابع الأصلي) أو متخالفاً لا تناظرياً (أي 1- مضروباً بالأصلي)، وكلتا الحالتَين مقبولتان ـ من حيث المبدأ ـ لأننا لا نستطيع أن نقيس إلا قيماً احتمالية (يعبِّر عنها مربَّعا طويلتَي التابعَين الموجيَّين).

إذاً أيَّ قيمة نأخذ: 1+ أم 1-؟ في الحقيقة يسمح ميكانيكُ الكمّ رياضياتياً بالإمكانيتَين، ومن ثم فإن الطبيعة تجد طريقةٍ تقدّم وتعرض فيها كلتا الإمكانيتَين! وإنه لأمر مذهل ما نحصل عليه.

يثبت في نهاية المطاف أنه عندما نتكلّم عن البوزونات، فإنّ القاعدة هي الحصول على إشارة الزائد (+) عند التبديل بين موقعَي الجسيمَين في التابع الموجي:

تناظر التبادل بالنسبة إلى بوزوناتٍ متطابقة: $\psi(\vec{x_1}, \vec{x_2}, t) = \psi$ $(\vec{x_2}, \vec{x_1}, t)$.

مع هذه النتيجة يمكننا أن نستبقَ حالاً أثراً فيزيائياً مهماً: يمكن لبوزونَين متطابقَين أن يتوضّعا في الموضع نفسه من المكان، أي $\vec{x_1} = \vec{x_2}$! وبالتالي يمكن لِـ $\psi(\vec{x}, \vec{x}, t)$ ألاّ يكون معدوماً. في الحقيقة يمكننا من خلال اعتبار عددٍ كبير من البوزونات متوضّعةً في المنطقة نفسها من الفضاء ويصفها تابع موجيٌ واحد كبير أن نبرهن أنّ المكانَ الأكثر احتمالاً لوجود البوزونات جميعِها في منظومةٍ ما هو أن تكون **مُكوَّمةً واحداً فوق الآخر!** يعني ذلك أنه من وجهة نظرٍ احتمالية لا غير، من الممكن إقناعُ عددٍ كبير من البوزونات المتطابقة أن يشغل المنطقةَ الصغيرةَ نفسها من الفضاء، بل ـ في الحقيقة ـ أن يشغل نقطةَ دبّوسٍ تقريباً لا غير من المكان؛ أو أن نُقنعَ بطريقةٍ مشابهةٍ بوزوناتٍ متطابقةً وعديدةً بأن تكون لها تماماً القيمةُ نفسها من الاندفاع. وهكذا نقول إنّ البوزونات تميل لأن «تتكاثف» ضمن حالاتٍ متراصّة (أو متماسكة)، وتُدعى هذه الظاهرة باسم **تكاثف بوز ـ إينشتاين.**

كما ذكرنا أعلاه، هناك تنويعات كثيرة من تكاثف بوز ـ إينشتاين وأنواعٌ مختلفة من الظواهر التي تشترك في احتوائها على فوتوناتٍ عديدة ضمن حالةِ حركةٍ كمومية واحدة. تولّد الليزرات حالاتٍ متماسكة لفوتونات كثيرة وعديدة تتكوّم وتتراكم جميعُها ضمن الحالة

نفسها للاندفاعِ متحرّكةً معاً بالطريقةِ ذاتها تماماً في الوقت نفسه. تتضمّن النواقلُ الفائقة أزواجاً من الإلكترونات يتمّ ارتباط عنصرَيها ضمن جسيمات بوزونية بتدويم (سبين) ـ 0، وذلك بفضل الاهتزازات البلّورية (الصوت الكمومي). يتضمّن مرورُ التيار الكهربائي في الناقل الفائق حركةً متماسكة لجمٍّ غفيرٍ من هذه الأزواج الإلكترونية المرتبطة التي تكون لها جميعاً الحالةُ الاندفاعيةُ نفسُها. أمّا السوائل الفائقة فهي حالات كمومية لبوزونات درجةُ حرارتها بالغة الصغر (كما في الهليوم السائل ^{4}He المذكور سابقاً)، بحيث يتكاثف مجملُ السائل ضمن حالةٍ واحدة من الحركة، ويغدو بالتالي حصناً منيعاً لا يتأثّر بالاحتكاك. على سوائل الهليوم الفائقة أن تكون مكوّنة من النظير ^{4}He، وذلك لأنّ النظير الآخر ^{3}He ليس بوزوناً (إنه فرميون؛ كما سنرى في المناقشة أسفله). يمكن حصولُ تكاثف بوز ـ إينشتاين في حالاتٍ تؤلّف فيها ذرّات بوزونية عديدة ـ عندما تتكاثف ـ قطراتٍ فائقة التراصّ بكثافةٍ عاليةٍ جداً، حيث تتكوّم الجسيمات بعضها فوق بعض في المكان. يذكّرنا تكاثف بوز ـ إينشتاين بما يحدث عندما يتمّ إيقاف الخصم(*) في لعبةٍ لكرة القدم الأميركية تجري بعد ظهر يومِ أحدٍ شتوي في مدينة الخليج الأخضر(**) (Green Bay).

من ناحية أخرى، عندما نبدّل في تابع الحالةِ الكمومية بين

(*) في لعبة كرة القدم الأميركية ـ كما في لعبة الركبي ـ يحاول دفاع الفريق إيقافَ الفريق الخصم من التقدّم بالكرة، وعندما يتمّ ذلك يحدث عادةً تكوّم لجميع اللاعبين بعضهم فوق بعض في محاولة البحث عن الكرة داخلهم، فيغدون جميعهم كأنهم كيانٌ واحد منفرد كبير.

(**) مدينةٌ تقع على نهر الثعلب (Fox) في منطقة الخليج الأخضر عند بحيرة متشيغان (Michigan) في الشمال الشرقي من ولاية ويسكنسون (Wisconson) في الولايات المتحدة.

موقعَي عنصرَي زوجٍ من الإلكترونات المتطابقة (فرميونات)، فإنّ القاعدة هنا هي الحصول على إشارة الناقص (ـ) أمام التابع الموجي. يصحّ ذلك على أيّ جسيم بتدويم (سبينٍ) كسري، مثل الإلكترونات التي يبلغ تدويمها (سبينها) 1/2:

تناظر التبادل بالنسبة إلى فرميونات متطابقة: $\psi (\vec{x_1}, \vec{x_2}, t) = - \psi (\vec{x_2}, \vec{x_1}, t)$.

نستطيع هنا استنتاجَ حقيقةٍ عميقةٍ على بساطتها تخصّ الفرميونات المتطابقة: لا يمكن لفرميونَين متطابقَين ـ حيث التدويمات (السبينات) أو الألوان (الشحنات اللونية) الكواركية جميعها «متوافقة ومتراصفة» ـ أن يشغلا الموضع نفسه في المكان: $\psi (\vec{x}, \vec{x}, t) = 0$. ينتج هذا لأننا عندما نبدّل بين الموضع $\vec{x}$ وبينه هو نفسه، فإننا نحصل على $\psi (\vec{x}, \vec{x}, t) = - \psi (\vec{x}, \vec{x}, t)$، وبالتالي $\psi (\vec{x}, \vec{x}, t) = 0$ لأنّ العددَ صفر وحدَه يتّصف بأنه يساوي عكسَه!

وبشكل عام لا يمكن لفرميونَين أيضاً أن يشغلا نفس الحالة الكمومية للاندفاع. يُعرَف هذا الأمر بـ**مبدأ الاستبعاد (الإقصاء) لِباولي**، وقد سُمِّي كذلك نسبةً إلى المنظّر اللامع السويسري ـ النمساوي وولفغانغ باولي. برهن باولي في الحقيقة أنّ مبدأَه الاستبعادي من أجل الجسيمات بتدويم (سبين) ـ 1/2 إنما ينجم عن تناظرات لورنتز (Lorentz) والتناظرات الدورانية الأساسية في قوانين الفيزياء. يتضمّن البرهان تفصيلاً رياضياتياً لما يحصل للجسيمات بتدويم (سبين) ـ 1/2 عندما يتمّ تدويرها، إذ يكافئ تبديلُ جسيمَين متطابقَين في حالةٍ كمومية تصف منظومةً ما تدويرَ هذه المنظومة عبرَ 180 درجة في فضاءاتٍ وتشكيلاتٍ معيّنة، وعندها يعطي سلوكُ التوابع الموجية الموافقة للجسيمات بتدويم (سبين) ـ 1/2 إشارةَ الناقص تلك.

تفسّر الخاصيةُ الاستبعادية للفرميونات وبشكل كبير استقرارَ المادة. هناك حالتان للتدويم (السبين) مسموحتان للجسيمات ذات التدويم (السبين) 1/2، وندعوهما «أعلى» و«أسفل» (تُشير كلمتا الأعلى والأسفل هنا إلى التوجّه بالمقارنة مع اتجاهٍ اعتباطي كيفيٍ في الفضاء). وهكذا يمكن أن نضع إلكترونَين في ذرة الهليوم فيَ حالةِ الحركة المدارية الموافقة لأخفض طاقة، حيث يماثل المدارُ ذو الطاقةِ الأدنى النمطَ الأخفضَ لوتر القيثارة المنقور (أو الحالةَ الأرضيةَ ـ الأساسيةَ للإلكترونات المقيّدة ضمن بئر كمومي). يستلزم وضعُ الإلكترونين في مدارٍ واحد جعلَ تدويم (سبين) أحدهما يُشير إلى «الأعلى» بينما يُشير تدويم (سبين) الآخر نحو «الأسفل». وحين يتمّ ذلك **لا نستطيع** إدخالَ إلكترونٍ ثالث في الحالة المدارية نفسها، لأنّ تدويمه (سبينه) ـ سواء أكان نحو الأعلى أم نحو الأسفل ـ سيكون مماثلاً لتدويم (سبين) أحد الإلكترونَين الموجودَين. عندها سيُلزم التخالفُ (اللاتناظر) التبادلي التابعَ الموجي بأن ينعدم. يعني ذلك أنه إذا حاولنا تبديل الإلكترونَين ذَوي التدويمَين (السبينَين) المتطابقَين في ما بينهما، فإنّ التابع الموجي سيكون معاكساً لنفسه وبالتالي صفراً! لذلك على الإلكترون الثالث أن يتوضّع في الذرة التالية من الجدول الدوري ـ ذرة الليثيوم ـ في حالةِ حركةٍ جديدة: أي في مدارٍ جديد. وهكذا يكون للّيثيوم **مدارٌ داخلي مملوء** أو «**غلافٌ مُغلَق**» (أي يحوي حالةَ هليوم بداخله كأنها محارة ذات قشرة مغلقة) وإلكترون خارجي منفرد. يتصرّف هذا الإلكترونُ الخارجي مثلَ الإلكترون الوحيد في ذرة الهيدروجين، ولذلك يمتلك الهيدروجين والليثيوم خصائص كيميائية متشابهة.

نرى هنا إذاً ظهورَ الجدول الدوري للعناصر. ولو لم تكُن الإلكترونات فرميونات تتصرّف بهذه الطريقة، لتهاوى كلّ إلكترون سريعاً نحو الحالة الأساسية ـ الأرضية، ولسلكت جميع الذرّات سلوكاً شبيهاً بغاز الهيدروجين، ولكانت الكيمياء الدقيقة للجزيئات العضوية (المحتوية على الكربون) مستحيلةً وغير ممكنة، وفي هذه الحالة لن يكون هناك وجودٌ لا لكانتاتا باخ ولا لسامعيها.

يقدّم النجمُ النتروني مثالاً آخر متطرّفاً عن السلوك الفرميوني. يتكوّن النجم النتروني عندما ينكمش للداخل لبُّ وقلبُ سوبرنوفا ضخمة، بينما تتطاير للخارج بقيةُ نجم السوبرنوفا كفتاتٍ وحطام. يتألّف النجم النتروني بالكامل من نترونات مأسورة ثقالياً. النترونات فرميونات بتدويم (سبين) ـ 1/2، لذا ينطبق عليها مبدأ الاستبعاد. يتمّ دعمُ حالة النجم في مواجهة الانهيار الثقالي من خلال حقيقةِ استحالةِ وضعِ أكثر من نترونَين (متخالفَي التدويم ـ السبين) في نفس الحالة الحركية. إذا حاولنا أن نضغط النجمَ أكثر فأكثر، فإنّ النترونات تبدأ بزيادة طاقاتها لأنها لا تستطيع أن تتكاثفَ جميعها ضمن حالة مشتركة ذات طاقة أصغرية. وبذلك يُخلَق نوعٌ من الضغط ـ أي مقاومة ضدّ الانسحاق والانهيار ـ تقود إليه حقيقةُ أنّ الفرميوناتِ غيرُ مسموحٍ لها بالتواجد في الحالة الكمومية نفسها.

في الحقيقة غالباً ما يحجز ويأسر النجمُ النتروني الحقلَ المغناطيسي للنجم الجبّار الأب الذي خلقه عبر انفجارٍ مستسعري حراري فائق (سوبرنوفا). يدور هذا الحقل المغناطيسي الشديد مع النجم النتروني بتواتر دوراني عالٍ، إذ قد يدور مئاتٍ من المرّات خلال ثانية واحدة. يكنس ويجرف هذا الحقلُ من خلال دورانه المادةَ التي تحوم وتطوف حول النجم الصغير، وبالتالي تغدو مُثارةً كهرمغناطيسياً. يخلق هذا الأمر بدوره ظاهرةَ توليدِ لُمَعٍ سريعة

وومضاتٍ خاطفة من الضوء نراها صادرةً من النجم، ويُعرف النجم هنا باسم **النجم النبضي**(*) (البَلزار)[13].

ما يلفتُ النظر في حالة النجم النتروني هو أنّه إذا تجاوزت كتلةُ هذا النجم 1,4 مرّة كتلة الشمس تقريباً، فإنّ الثقالةَ سوف تهزم الإقصاءَ الفرميوني. وعندما تفوز الثقالةُ فإنّ النجم النتروني ينهار ليصبحَ ـ لقد حزرْتَ ـ ثقباً أسود. وبالمقابل عندما تموت نجومٌ مثل شمسنا بطريقةٍ أكثر وداعةً وهدوءاً من السوبرنوفا الجبّارة، فإنها تبرد وتغدو أكثر احمراراً شيئاً فشيئاً، حالُها في ذلك كحال الجمرات المنطفئة في نارِ المخيَّم. تتقلّصُ هذه النجوم في البدء، وتنكمش غيرَ قادرةٍ على دعم ومؤازرة نفسها ـ بواسطة ضغطها الإشعاعي ـ في مواجهة الثقالة. ولكنّ الإلكترونات ـ في مثل هذا النجم ـ يمكنها في نهاية المطاف أن تحافظ على النجم ضدّ الانهيار الثقالي، إذ إنّ محاولةَ ضغط النجم سوف تُجبر الإلكترونات على التموضع في مستوياتِ طاقية أعلى فأعلى، والنجم ليس ثقيلاً بما يكفي للتغلّب على هذا «الضغط الاستبعادي». سوف تُنهي النجومُ ذات الكتل الأصغر من 1,4 مرّة كتلة الشمس حياتَها كعوالمَ ميّتة، عوالم باردة وخامدة لا حيوية فيها تُدعى بـ**الأقزام**، حيث ينتصر ميكانيكُ الكمّ للمادّة على الثقالة. وعند النجوم النترونية الأثقل من 1,4 مرّة كتلة الشمس، فإنّ الثقالةَ تفوز وينهرس النجمُ لينهار نحو ثقبٍ أسود يمثّل

(*) نقصد بالنجم النبضي (Pulsar) نجماً نترونياً دوّاراً ممغنطاً يصدر إشعاعاتٍ كهرمغناطيسية بشكل أمواج راديوية تبدو عند ملاحظتها من الأرض بشكل نبضات.

(13) حسناً هذا هو ما يقوله العلم. لكنْ هناك تفسيرٌ بديلٌ لنبضات هذه النجوم النبضية (البَلزارت) يتمثّل في أنها أبراجُ اتصّالاتٍ لشبكةِ هواتفِ خليويةٍ كبيرة بين الكواكب ابتكرتها حضارةٌ متقدّمة غير بشرية، وهي تبثّ رسائل إلى الشيوعيين الذين يرغبون بفَلْورة (إضافة الفلور) مائنا. في الحقيقة وضع اكتشافُ البَلزر الأول الفلكيين الذين اكتشفوه في حالةِ تامّة من الدهشة والارتباك.

تهديداً خطيراً على الملاحة بين النجوم. تُدعى هذه القيمة الحاسمة لِـ 1,4 مرّة من كتلة الشمس بـحدّ **(أو نهاية) تشاندراسِخار**(*) (Chandrasekar)، وهي تعيّن الحدودَ التي نعبر عندها من منطقة انتصار مبدأ الاستبعاد إلى منطقة انتصار الثقالة، وذلك في الحرب التي ستحدّد المصير النهائي للنجم المحتضر.

تنجم جميعُ هذه الظواهر الغريبة العيانية عن **تناظر التبادل** في التوابع الموجية الكمومية للجسيمات الأولية. ونحن لا نلاحظ تناظرَ التبادل هذا في حالة كلاب البودل أو في حالة الناس أو أيّ كائناتٍ وأجسامٍ عيانية أخرى نألفها في حياتنا اليومية، وهذا «ببساطة» نتيجةٌ ناجمة عن تعقّدها. يستلزم التعقّدُ وجوبَ كونِ الجسيمات المنفردة بعيدةً عن بعضها البعض بحيث يمكن وجودُ حالاتٍ كمومية مختلفة عديدة، وبالتالي لا تقترب الجسيمات أبداً من التوضّع في نفس الحالات الكمومية في الوقت نفسه. يختلف بودل عن بودل آخر بسبب الترتيب المعقّد لمكوِّناته الكمومية. وهكذا لا تكون آثارُ التطابق جليّةً في المنظومات المعقّدة والممتدة التي تأخذ حيّزاً مكانياً والبعيدة جداً عن حالتها الكمومية الأرضية ـ الأساسية[14].

التقاء النظرية الكمومية بالنسبية الخاصة: المادة المضادة

ماذا يحدث عندما يلتقي ميكانيكُ الكمّ بالنسبية الخاصة؟ شيءٌ لا يُصدّق.

(*) يقصد المؤلّفان هنا بحدّ تشاندراسِخار ما يُعرَف تقنياً باسم حدّ (نهاية) تولمان ـ أوبنهايمر ـ فولكوف (Tolman-Oppenheimer-Volkoff) التي تمثّل الكتلة الأعظمية الممكنة لنجم نتروني، وتكون قيمتها محصورةً بين 1 و3 مرّة كتلة الشمس؛ بينما يحصر بعضُ العلماء استعمالَ حدّ تشاندراسخار للدلالة على الكتلة الأعظمية الممكنة لقزمٍ أبيض.

(14) للاستزادة في المعلومات حول ميكانيك الكمّ نعتقد أنّ أفضل مكانٍ تبدأ فيه هو:
Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Ma: Addison-Wesley, 1963).

نذكر من النسبية أنّ مقاديرَ الطاقة والاندفاع والكتلة لجسيم ما مرتبطةٌ بالعلاقة $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$، وهذا نتيجةٌ للتناظرات التي يتمتّع بها الزمكان في النسبية الخاصة مع نظرية نوثر. من أجل حساب طاقة الجسيم فإننا نكتب أولاً شكلاً مكافئاً للصيغة السابقة: $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$، ثم لحساب الطاقة يجب أن نأخذ الجذر التربيعي لهذا التعبير الرياضياتي لـ E. مع ذلك نعلم أنّ أيَّ عددٍ له جذران تربيعيان اثنان. على سبيل المثال، للعدد 1 الجذر $1 = \sqrt{1}$ لأنّ $1\times1=1$، وكذلك الجذر $-1 = \sqrt{1}$ لأنّ $-1 \times -1 = 1$، والجذر التربيعي «الآخر» لعددٍ موجب هو عدد سالب. ولكن كيف لنا أن نتأكّد من أنّ الطاقةَ المشتقّة من صيغ إينشتاين يجب أن تكون موجبة؟ كيف يمكن للطبيعة معرفةُ ذلك؟ ما هو مصير الحلّ الآخر ذي الطاقة السلبية؟

تُخبرنا الفطرةُ السليمة أنّ الطاقة ـ خاصةً الطاقة السكونية mc^2 لجسيماتٍ ذات كتلة ـ يجب أن تكون موجبةً دوماً. من أجل ذلك رفض الفيزيائيون في الأيام الأولى للنسبية الخاصة ـ وبكلّ بساطة ـ الكلامَ عن الإمكانيةِ الموافقة للجذر التربيعي السالب محتجّين بأنّ هذه الطاقة السالبة لابدّ أن تكون «زائفة» لا تصف أيّ جسيماتٍ فيزيائية.

ولكن هل يمكن وجودُ جسيماتٍ **بطاقة سالبة**، حيث نأخذ الجذرَ التربيعي السالب $E = -\sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$؟ إذا قبلنا بذلك سنجد أنه في حالة كان الاندفاع مساوياً لقيمة الصفر، يكون لهذه الجسيمات طاقة سكونية سالبة قيمتها $-mc_2$. وإذا ما ازداد الاندفاع ستنقص الطاقة في الحقيقة، وبالتالي مع فقدان هذه الجسيمات للطاقة من خلال تصادمها مع الجسيمات الأخرى أو من خلال إشعاعها لفوتونات فإنها سوف **تزداد سرعةً!** في الواقع ستصبح طاقتها سالبةً أكثر فأكثر، لتغدوَ في نهاية المطاف مقداراً سالباً لامتناهياً. إنّ مثل

هذه الجسيمات لن تتوقّف عن التسارع، وستسقط في هاوية الطاقة السالبة اللانهائية، وسيغدو كونُنا مليئاً بمثل هذه الجسيمات الغريبة ذات الطاقة اللانهائية سالبة الإشارة.

إنّ هذه المعضلة مدفونة عميقاً في بنية نسيج النسبية الخاصة، وببساطة لا يمكن أن نتجاهلها. وهي تغدو صعبةَ المراس وأكثر عسرةً عندما نحاول ابتكار نظرية كمومية للإلكترون، إذ يتبيّن هنا في نهاية المطاف أننا لا نستطيع أبداً تجنّبَ الإشارة السالبة للجذر التربيعي. تُجبر إذاً النظريةُ الكمومية الإلكتروناتِ على امتلاك كلتا القيمتَين الموجبة والسالبة للطاقة من أجل قيمةٍ معطاة للاندفاع. سنقول إذاً إنّ الإلكترون بطاقةٍ سالبة يمثّل حالةً كموميةً مسموحةً أخرى للإلكترون. ولكن هذا الأمر بدوره سيجلب كارثةً معه، لأنه يعني أنّ الذرّات المألوفة ـ وحتى ذرات الهيدروجين البسيطة ـ لن تكون مستقرّة، إذ يمكن للإلكترون ذي الطاقة الموجبة أن يُصدر فوتوناتٍ مجموعُ طاقاتها $2mc^2$ لينتهيَ به الأمرُ كإلكترون سالب الطاقة، ثم يُكمل مسيرة سقوطه نحو هاوية الطاقة السالبة اللامتناهية في الكبر. من البديهي إذاً أنّ مجملَ الكون لن يكون مستقراً إذا وُجدت حالاتُ الطاقةِ السالبة بالفعل. لقد سبّبت مسألةُ حالاتِ الإلكترون ذاتِ الطاقة السالبة صداعاً من الدرجة الأولى عند المحاولات الأولى لابتكارِ نظريةٍ كمومية لإلكتروناتٍ تتفاعل مع الضوء تكون منسجمةً مع نظرية إينشتاين في النسبية الخاصة.

خطرت ذات يوم من عام 1926 فكرةٌ لفيزيائيّ نظريّ لامع هو بول ديراك (Paul Dirac). كما رأينا يقول مبدأ الاستبعاد لباولي بعدمِ إمكانيةِ وضع إلكترونَين في نفس حالةِ الحركةِ الكمومية تماماً في الوقت نفسه. يعني هذا أنه فورَ قيام إلكترونٌ ما بشغل حالةِ حركةٍ معطاة (حالة كمومية)، فإنّ هذه الحالةَ تصبح **مملوءة**، ولا يمكن لإلكتروناتٍ أخرى الانضمامُ إليها.

كمنت فكرة ديراك في أنّ **الفراغَ نفسه** مملوءٌ تماماً بالإلكترونات التي تشغل جميع الحالات ذات الطاقة السالبة. إذا كانت جميع حالات الطاقة السالبة هذه مشغولةً، فعندها لن تقدرَ الإلكتروناتُ ذاتُ الطاقة الموجبة ـ مثل تلك الموجودة في الذرّات ـ أن تُصدر فوتونات، وبالتالي لن يمكنَها السقوطُ إلى هذه الحالات سالبة الطاقة لأنه تمّ **استبعادها** عن فعل ذلك. في الحقيقة يغدو الخلاءُ بمجمله الآن ذرّةً واحدة هائلة الضخامة، حيث جميعُ حالات الاندفاع ذات الطاقة السالبة مشغولةٌ ومملوءة. يبدو أنّ هذا الحلّ يضع حداً لقضيةِ مستوياتِ الطاقة السالبة ومشاكلِها نهائياً وعلى نحوٍ حاسم.

مع ذلك أدرك ديراك أنّ ذلك الحلّ ليس نهاية القصة، فمن الممكن نظرياً «إثارةُ الفراغ»، ويعني هذا أنه يمكننا هندسةُ حادثةِ صدمٍ بحيث نقتلعُ فيها إلكتروناً سالبَ الطاقة من الفراغ (تماماً كما يفعلُ صياد السمك عند اصطياده واقتلاعه لسمكةٍ من أعماق البحر ووضعها في مركبه). على سبيل المثال، لنفترض أنّ إشعاعاً شديداً لِـغاما اصطدم بإلكترونٍ يشغل حالةً سالبةَ الطاقة في الفراغ، ولنفترض كذلك أننا وفّرنا جسيماتٍ أخرى لتشاركَ في حادثة الصدم ـ مثل نواةٍ ذرّية ثقيلةٍ قريبةٍ في الجوار ـ من أجل تحقيق مصونية الاندفاع والطاقة والاندفاع الزاوي. سوف يقتلع إشعاعُ غاما الإلكترونَ من حالته سالبة الطاقة، ليضعه في حالةٍ ذات طاقة موجبة مع حدوث ارتدادٍ للنواة الثقيلة، وسيخلّف كلُّ هذا وراءه **ثقباً** في الفراغ.

أدرك ديراك أنّ الثقبَ هو غيابٌ لإلكترونٍ بطاقة سالبة، ويعني هذا أنّ الثقبَ في الواقع له طاقةٌ **موجبة.** مع ذلك سيعبّر الثقبُ كذلك عن غيابِ لإلكترونٍ مشحونٍ سالب الشحنة الكهربائية، وبالتالي سيمثّل الثقب جسيماً **موجبَ الشحنة.** ندعو هذا الكائن باسم **البوزيترون.** يمتلك الثقب إذاً في حالة السكون طاقةً مساويةً تماماً لـ: $E = +mc^2$، حيث m تساوي تماماً كتلة الإلكترون. إنّ البوزيترونات

هي الجسيمات المضادة للإلكترونات، ولابدّ من تواجدها إذا كانت كلتا نظريّتَي النسبية الخاصة وميكانيك الكمّ صالحة.

في الحقيقة تمّ اكتشافُ البوزيترونات عام 1933 من قبل كارل أندرسون (Carl Anderson)، حيث تمّت رؤيتُها كآثارِ مساراتٍ في **الحجرة الغيمّية**(*) مع وجود حقلٍ مغناطيسي قويّ يسبّب انعطافَ وانحناءَ حركةِ الجسيم بطريقةٍ تُظهر الشحنة الكهربائية للجسيم(**). كانت الحجرة الضبابية نوعاً باكراً من كواشف الجسيمات احتوى على هواءٍ مفرَط الإشباع(***) لبخار الماء أو لبخار الكحول. في أثناء مرور الجسيم المشحون عبر الحجرة فإنّ البخار يتكاثف ويشكّل قطيرات ضبابية صغيرة تعلِّم مسارَ الجسيم، وبالتالي يمكن تصويره. لاحظ أندرسون أزواجاً لإلكتروناتٍ وبوزيتروناتٍ كمسالكَ ثنائيةٍ منحنيةٍ ومنفصلةٍ في الحجرة الضبابية بعد عدة سنوات من تنبّؤ ديراك بها. وفعلاً ساوت كتلةُ البوزيترون كتلةَ الإلكترون تماماً، كما يستلزم تناظر النسبية الخاصة.

عندما تصطدم المادة بالمادة المضادة فإنّ إحداهما تفني الأخرى مع إصدارِ كثيرٍ من الطاقة (تحوّل مباشرٌ للطاقة السكونية) على شكل خلق جسيمات أخرى. ببساطة يقفز الإلكترون هنا نحو ثقبه في «بحر ديراك»، وتظهر الطاقةُ الصادرة في الغالب على شكل فوتونات أو غيرها من الجسيمات ذات الكتلة الضئيلة.

(*) وعاءٌ مُشبَع ببخار الماء الذي يسمح تمدّده المفاجِئ بأن يبيّن مرورَ ومسلك جسيم مشحون كأثرٍ من قطيرات مرئية.

(**) تبينّ جهةُ انحناءِ المسار إشارةَ الشحنة الكهربائية للجسيم، ويمكن حساب قيمة الشحنة من مقدار الانحناء.

(***) هواء حاوٍ على مقدارٍ من بخار الماء (أو بخار الكحول) أكثر ممّا يلزم لإشباعه، وبالتالي لا يكون مستقراً.

سيكون أمراً جيداً لو استطعنا استخراجَ المادة المضادة من مكانٍ ما في الكون، لأنّ ذلك سوف يزوّدنا بمصدرٍ ممتاز للطاقة. مع ذلك ـ ولأسبابٍ لا تزال مجهولةً إلى يومنا الحاضر ـ لا يوجد منبعٌ متبقٍ في الكون يوفِّر المادة المضادّة بمقاديرَ كبيرةٍ. كما رأينا في الفصل 8، يفسِّر المنظرون كيفيةَ حدوث هذا الأمر في الكون من خلال انتهاك الـ CP، ولكنّ الآلية الدقيقة لذلك لا تزال تقع في عالَم الفيزياء الحديثة التي تنتظر الاستكشاف. تتولّد البوزيترونات بشكلٍ طبيعي خلال التفكّك الإشعاعي لبعض النوى المتحلّلة، وقد وجد هذا الأمر تطبيقاتٍ له في مجال التصوير الطبي (التصوير الشعاعي الطبقي من خلال إصدار البوزيترونات (Positron Emission Tomography)، أو مُسوحات الـ PET). من غير الواضح ما إذا كانت فائدةُ المادة المضادة سوف تنتشر وتتّسع لتصل إلى تشغيل محرّكات المركبات الفضائية، ولكنْ يبدو أنها في نهاية المطاف سوف تجد تطبيقاتٍ أكثر عمليةً، وقد يكون لها أثر كبير في الاقتصاد المستقبلي.

يتمثّل أحد الحلول البعيدة لمسألة الطاقة على مستوى الأمّة في بناء مسرِّع جسيمات في مدارٍ قريبٍ جداً من الشمس، حيث الطاقة الشمسية متوفِّرة وبكثرة (تبلغ استطاعة الطاقة الشمسية ـ على ارتفاع مليون مل فوق سطح الشمس ـ حوالي 10 ميغا واط في المتر المربّع؛ ولكن لسوء الحظ سيكمن أحدُ التحديّات الرئيسية في إيجاد مواد غير قابلة للانصهار عند درجات الحرارة العالية هناك). مع بناء هذه الآلة المُستخدِمة لطاقة الشمس الكبيرة، يمكننا أن نصنع ونقوم بجمع 500 كيلوغرام سنوياً من المادة المضادة، ثم نعيدها إلى الأرض ضمن زجاجات مغناطيسية. سيحرّر إفناءُ هذه المادة المضادة مع المادة على الأرض كتلةً سكونية مكافئة لـ 1000 كيلوغرام من الطاقة (أي ما يعادل الطلبَ السنوي الراهنَ للطاقة في الولايات

المتحدة). يمكن أن تظهر بعضُ الحواجزِ والموانع التقانية التي تقف في سبيل ما ذكرناه، ولكنّ أيّاً منها ـ على ما يبدو ـ يمكن تجاوزه بدفع النقود. من الأفضل لنا العيشُ في مثل ذلك العالَم من خلال فيزياء الجسيمات.

قد لا نعرف ماذا ستكون عليه التطبيقات العملية النهائية للمادة المضادة، ولكننا متيقّنون أنّ الحكومة سوف تفرض ضرائب عليها.

الفصل الحادي عشر
التناظر المخفي في الضوء

آه، أعتقد أنني أستطيع البقاء يقظاً حتى ذلك الوقت

جيمس كلارك ماكسويل

حين إخباره لدى وصوله إلى جامعة كامبردج بأنّ هناك صلاة إلزامية للجميع في الكنيسة عند الساعة 6 صباحاً

كان أمراً معلوماً منذ بضع مئات من السنين أنّ الشحنة الكهربائية تبقى مصونة في أيّ عملية فيزيائية. ترسّخت هذه الفكرةُ في منتصف القرن الثامن عشر من خلال أشخاص مثل وليام واطسون (William Watson) وبنيامين فرانكلين (Benjamin Franklin). إنّ قانون المصونية هذا أساسيٌ في النظرية التقليدية (الكلاسيكية) للحقول الكهربائية والمغناطيسية أي للكهرمغناطيسية. لنرَ مثالاً عن مصونية الشحنة من خلال تناولنا لتحلّل النترون وتفكّكه: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu^0$. إنّ النِترون معتدل الشحنة الكهربائية وبالتالي تكون شحنته الكهربائية معدومة. عندما يتحلّل ويتفكّك النترون فإننا نحصل على بروتون موجب الشحنة وعلى إلكترون سالب الشحنة بالإضافة إلى نترينو (مضاد) حيادي الشحنة. تساوي الشحنةُ الموجبة للبروتون تماماً معكوسَ الشحنة السالبة للإلكترون، وبما أنّ الشحنة الكهربائية للنترينو معدومة، فإنّ الشحنة الكهربائية الكلية للنواتجِ النهائية لتفكّك

النترون تساوي الصفر. إنّ مصونيةَ الشحنة الكهربائية صالحةٌ في جميع العمليات والإجرائيات الفيزيائية: فنحن لم نرَ أيَّ كسبٍ أو ضياعٍ صافيَّين للشحنة الكهربائية في أيّ عملية فيزيائية. يدفعنا وجودُ هذه المصونية مع نظرية نوثر إلى التساؤل عن ماهية التناظر المستمرّ التحتي الذي يقتضي قانون المصونية هذا؟

تعبّر الكهرمغناطيسية أو الديناميكا الكهربائية (الإلكتروديناميك (Electrodynamics)) عن الوصف الفيزيائي للحقول الكهربائية والمغناطيسية بالإضافة إلى الشحنات والتيارات الكهربائية؛ ولقد تمّت صياغتها ضمن إطارٍ تقليدي (كلاسيكي) غير كمومي طيلة امتداد القرن التاسع عشر. ما يُعدّ عادةً الإنجازَ الأكبرَ هنا هو صياغةُ الكهرمغناطيسية من خلال معادلات ماكسويل التي نشرها جيمس كلارك ماكسويل في عام 1865، وهي مجموعةٌ مُوجَزة وكاملة من المعادلات التي تُلخِّص مجملَ المظاهر المعروفة للإلكتروديناميك، وتسمح لنا بحساب الحقلَين الكهربائي والمغناطيسي في أيّ موضع من المكان والزمان، من أجل اختيارٍ ما لتوزيعاتٍ معيّنة للتيار الكهربائي والشحنات الكهربائية[1].

---

(1) هناك كتب عديدة ذات مستويات مختلفة تُعنى بتعليم الكهرمغناطيسية. من أجل الابتداء بذلك في مستوى جامعي، انظر: Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics* (Reading, Ma: Addison-Wesley, 1963), vol. 2,

أمّا الكتاب المُعتَمد النموذجي لمستوى الدراسات العليا فهو: John David Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd Ed. (New York: Wiley, 1999).

يعرض الموقع الإلكتروني لقسم الفلك وفيزياء الفضاء في جامعة أبسالا [(Uppsala) مدينة في السويد إلى الشمال من استوكهولم] نصّاً قابلاً للتحميل مجّاناً عن الإلكتروديناميك الكلاسيكي الإلكتروديناميك الكلاسيكي (Classical Electrodynamics)، بالإضافة إلى وصلاتٍ عديدة إلى مواقع ذات صلة في: Bo Thidé, «Classical Electrodynamics,» www.plasma.uu.se

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 11 حزيران/ يونيو 2004)

يُعتَبر ماكسويل ـ الذي وُلد في اسكتلندا وامتدّت حياته لثمانية وأربعين عاماً لا غير ـ شخصيةً شامخةً في تاريخ العلوم، وتُقارن أهميةُ أعماله في تاريخ الفيزياء بتلك التي لنيوتن وإينشتاين. لقد كان أولَ من أدرك أنّ الضوء عبارة عن اضطرابٍ موجي منتشرٍ للحقلَين الكهربائي والمغناطيسي، وأنه عبارة عن حلٍّ للمعادلات التي تصف مجملَ الظواهر الكهربائية والمغناطيسية: معادلات ماكسويل. في الحقيقة إنّ قوانين النسبية الخاصة محتواة ضمن نظرية ماكسويل، وما قام به إينشتاين هو «ببساطة» اكتشافُها وإظهارها إلى النور من خلال تأمّله بالتناظرات التي تتمتّع بها هذه المعادلات في حالاتٍ مختلفة من الحركة العطالية.

لا معنى لنظرية ماكسويل التقليدية (الكلاسيكية) من دون قانون مصونية الشحنة. ومع ذلك بدا التناظرُ المستمرّ التحتي الذي قاد إلى هذه المصونية ـ في بادئ الأمر ـ غامضاً ومبهَماً نوعاً ما.

إنّ الشحنات الكهربائية هي منابعُ **الحقول الكهربائية**، كما الكتلةُ هي منبع الحقل الثقالي في نظرية نيوتن للثقالة. الحقل الكهربائي ما هو إلاّ القوة الكهربائية المُطبَّقة على وحدة الشحنة الكهربائية في أيّ نقطة من الفضاء. عندما تتحرّك الشحنات الكهربائية فإنها تصبح تيّاراتٍ كهربائية وتخلق **حقولاً مغناطيسية**، وتولّد هذه الأخيرة بدورها قوىً تؤثّر على الإلكترونات المتحرّكة (التيّارات الكهربائية). في الحقيقة يغدو الحقلُ الكهربائي الصرف في أيّ مكان حقلاً كهربائياً ومغناطيسياً مجتمعَين معاً إذا ما تحركنا خلاله.

لا تسمح نظريةُ ماكسويل بحلولٍ لمعادلاتها يختفي فيها منبعٌ للحقل في «بالوعة» أو تذهب شحنةٌ كهربائية إلى العدَم. يُعتبر هذا الأمرُ مطلباً ضرورياً وصارماً من الفيزياء بحيث لا يستطيع شيءٌ ـ ولا حتى جحيم الأساطير اليونانية تارتاروس أو الثقب الأسود ـ أن يسمح

باختفاء الشحنة الكهربائية. إذا سقطت شحنةٌ كهربائية في ثقبٍ أسود فإنه يصبح مالكاً لقيمةٍ للشحنة الكهربائية مساويةٍ لقيمة ما ابتلعه. ومع ذلك لو أوقفنا المناقشة عند هذه النقطة فإنها ستبقى ناقصة، إذ ما هو التناظر المستمرّ التحتي الذي تستلزمه نظريةُ نوثر طالما يقتضي انحفاظَ الشحنة الكهربائية؟ لابدّ من وجوده في مكانٍ ما، ولكن أين؟

إشارات وتلميحات عن وجود تناظر ما

إذا قمنا ـ رغم ما ذكرناه ـ بسبر البنية الرياضياتية لنظرية ماكسويل بشكلٍ أعمق، فسنجد أنّ هناك شيئاً أكثرَ أساسيةً من الحقول الكهربائية والمغناطيسية. وقد أُعطِي هذا الشيء تسميةً مزخرفة: **حقل المعيار**. يرتبط الحقلُ المعياري بالحقلَين الكهربائي والمغناطيسي بطريقةٍ غريبة: إذا عرفنا حقلَ المعيار في منطقةٍ ما من المكان والزمان، فإننا نستطيع دوماً حسابَ قيم الحقلَين الكهربائي والمغناطيسي في هذه المنطقة. ولكنّ هذه الإجرائية غير عكوسة، أي إننا لا نستطيع من أجل قيم معروفةٍ للحقلَين الكهربائي والمغناطيسي في المنطقة نفسها أن نحدّد تماماً حقلَ المعيار الذي أنتجها. في الحقيقة نستطيع دوماً إيجاد **عددٍ لانهائيٍّ** من حقول المعيار التي تنجم عنها نفسُ القيم الملاحَظة للحقلَين الكهربائي والمغناطيسي.

يبقى حقلُ المعيار دائماً غيرَ قابلٍ للتعيين تماماً، أي يظلّ هناك دوماً التباسٌ وغموضٌ في شكل حقل المعيار إذا ما أردنا إعادةَ إنشائه. علاوةً على ذلك، وفي حين أنه يمكن بسهولةٍ قياسُ الحقلَين الكهربائي والمغناطيسي في المخبر، فإننا لا نستطيع تحديدَ حقل المعيار لا بواسطة النظريّة ولا عبر التجربة. حتى لو أخذنا قيماً صفرية للحقلَين الكهربائي والمغناطيسي (أي الفراغ)، فإنّ ذلك لا

يعيّن قيمة حقل المعيار؛ فهناك حقولُ معيارٍ مختلفة ولانهائية في عددها تقتضي كلّها قيمةَ الصفر للحقلَين الكهربائي والمغناطيسي. لذلك يُعتبَر حقلُ المعيار «حقلاً مخفياً» صعبَ الانقياد، حيث لا يمكن لأيّ قياسٍ فيزيائي أن يحدّد شكله الدقيق.

تمّ إدخالُ مفهوم حقل المعيار في البدء كأداةٍ يُعبَّر بدلالتها بسهولة عن القوى الكهربائية والمغناطيسية، وذلك من قبل علماءٍ مختلفين منذ أوائل القرن التاسع عشر ولغاية منتصفه. في كثيرٍ من الأحيان دوّن أشخاصٌ مختلفون حقولَ معيارٍ مختلفة وبصيغ متنوّعة، ولم يكن من الواضح ما إذا كانت هذه الحقول تصف ظواهرَ فيزيائية مختلفة أم لا، ولكنّ هيرمان لودفيغ فرديناند فون هلمهولتز (Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz) - وهو مساهمٌ رئيس في صياغة نظرية الكهرمغناطيسية - بيّن في سنة 1870 أنّ الصيغَ المختلفة لحقول المعيار إنما تقود إلى نفس النتائج الفيزيائية أي إلى الحقول الكهربائية والمغناطيسية نفسها. وبذلك يمكن الانتقال وبشكل مستمر من حقلِ معيارٍ ما إلى حقلٍ آخر مع بقاء الفيزياء نفسها. يُعدّ هذا أوّلَ مثالٍ عن تحويلٍ تناظري جديد في الإلكتروديناميك - «تحويلٌ معياري» أو «تحويلٌ لِمعيار» - بالرغم من أنّ مقتضياته كتناظر أساسي في الطبيعة لم تُقدَّر جيداً ولم تُعطَ حقّها في ذلك الحين[2].

---

(2) اتصال شخصي بين جون ب. رالستون (John P. Ralston) وكريستوفر هيل في أيار/ مايو 1996، انظر ايضاً: J. D. Jackson and L. B. Okun, «Historical Roots of Gauge Invariance,» *Reviews of Modern Physics*, vol. 73 (2001), p. 663.

كتب جاكسون وأوكون يقولان: «أمر مهمّ بهذا الخصوص - وإن كان هامشياً في التاريخ الفعلي للصمود (اللاتغيّر) المعياري - هو تطوير جيمس ماك كالا (*James MacCullagh*) الباكر لنظريةٍ ظواهرية عن الضوء كاضطرابٍ ينتشر ضمن شكلٍ جديد من الأثير المرن، حيث لا تعتمد الطاقة الكامنة على الضغط والتشويه بل على مجرّد الدوران =

في الحقيقة إذا عكسنا الأمر وأصرَرنا على ضرورة بقاء حقل المعيار دوماً حقلاً مخفياً لا يمكن تحديده أبداً بشكل جليّ غيرِ قابل للَّبْس، فإننا نكتشف حينها أمراً لافتاً للنظر: يقتضي التناظرُ المعياري وجوبَ انحفاظ الشحنة الكهربائية! يمكننا أن **نُحوِّل** وبشكل مستمرّ حقلَ المعيار الذي اخترناه إلى حقلِ معيارٍ آخر، من دون تغيير قيم الحقلَين الكهربائي والمغناطيسي، وهذا هو التناظر الذي يؤدي بواسطة نظرية نوثر إلى مصونية الشحنة الكهربائية. يُدعى هذا التناظر المخفي والغريب بـ**اللاتغير أو الصمود المعياري**.

شكّلت الحقول المخفية ـ أو «نظريات المتغيّرات الخفيّة»(*) ـ على الدوام أمراً مزعجاً نفسياً بالنسبة إلى الفيزيائيين، وقدّم كثيرٌ منهم على مرّ العصور حججاً ضدّها مستندةً إلى أرضيةٍ فلسفية؛ فالطبيعة يجب أن

= الموضعي للوسط من أجل جعل اهتزازات الضوء محضّ عرضانية... توافق معادلاتُ ماك كالا (عندما يتمّ تفسيرها بشكل مناسب) معادلاتِ ماكسويل للحقول الحرّة في أوساط غير متناظرة كروياً. نشكر جون. ب. رالستون على جعل هذه المخطوطة غير المنشورة لعمل ماك كالا في متناول أيدينا».

وهكذا أنشأ ماك كالا بالفعل نظريةً للضوء باعتباره اضطراباً موجياً ضمن وسط ماديّ ـ نوع من «الأثير» ـ سنة 1839. تكافئ هذه النظرية نظريةَ ماكسويل التي أتت بعدها بحوالي خمسة وعشرين عاماً، وهي تتضمّن مفهوم الحقل المعياري غير القابل للملاحظة؛ وبذلك يبدو أنّ ماك كالا اكتشف مبدأ التناظر الموافق للصمود (اللاتغيّر) المعياري الموضعي. ولكنْ لابدّ من التنبيه إلى أنّ العلاقة بين البنية الفيزيائية التحتية هنا ـ المتضّمنة لمفهوم الفتل (أو الدوران الموضعي) في وسط ماديّ ـ وبين الإلكتروديناميك هي علاقة ضعيفة إلى حدٍّ بعيد. لقد حصل هذا الاكتشاف من دون أن يلاحظه أحد تقريباً في ذلك الحين؛ ويمكن القول إنّ ماك كالا ـ الذي لم تكن علاقته ببقية مجتمع الفيزيائيين علاقة ودّية والذي انتهت حياته بطريقة مأسوية عبر الانتحار ـ ربّما كان متقدّما بأشواط على عصره.

(*) احتجّ بعضُ العلماء ـ وعلى رأسهم إينشتاين ـ ضدّ اللاحتمية الموجودة في صلب ميكانيك الكمّ بأنها ناجمة عن جهلنا لقيم كثيرٍ من المتحوّلات الخفيّة التي لو عرفناها لكانت النتيجة دوماً حتمية. تُدعى النظرياتُ التي تعتمد مثلَ هذه الأفكار بنظريات المتغيّرات الخفيّة (Hidden Variables Theories).

تكون قابلةً للتوصيف بدلالة أشياء نستطيع قياسها أو ملاحظتَها مباشرةً، ويبدو أنّ هذه الفكرةَ أتت من فلاسفةٍ مثل ديكارت (Descartes) تألّبوا ضدّ فكرة وجود أرواحٍ شيطانية خفيّة تتلاعب بالعالَم عبر طرقٍ غير مرئية. مع ذلك يبدو أنّ نقطةَ الخلاف الفلسفية هذه لا تمانعها الطبيعة، فمجملُ التابع الموجي الكمومي لإلكترونٍ ما غيرُ قابلٍ في حدّ ذاته للملاحَظة والمراقبة بشكلٍ مباشر، ووحدُها طويلتُه المطلقة ـ التي تعبّر عن احتمال وجود الإلكترون متوضّعاً في مكانٍ ما ـ هي ما يمكن قياسُه في التجربة. ينضم الآن حقل المعيار إلى التابع الموجي كظاهرة غير قابلة للملاحظة في الطبيعة.

ولكن لننتبه ولنتساءَل: هل يمكن لهاتَين السّمتَين الخفيّتَين في الطبيعة أن تندمجا معاً لتشكيل شيءٍ أكثر ضخامةً؟ في الواقع يغدو تناظرُ اللاتغيّر المعياري أكثرَ إقناعاً وضرورةً ـ وبمعنى من المعاني أسهلَ على الفهم ـ عندما ندخل عالَم ميكانيك الكمّ. يبدو الأمر وكأنّ الإلكتروديناميك التقليدي (الكلاسيكي) يتوسّل من أجل وجود ميكانيك الكمّ.

اللاتغيّر (الصمود) المعياري الموضعي

بزغ تناظرُ الصمود المعياري كموضوعٍ إجماليّ شامل خلال القرن العشرين مع تطوير ميكانيك الكم والجهود التي بُذلت من أجل وضع الإلكترون والكهرمغناطيسية معاً ضمن نظرية متّسقة ومنسجمةٍ داخلياً تماماً. في الحقيقة لقد مثّل اللاتغيّرُ المعياري الموضوعَ المسيطِر على أفكار الفيزياء في القرن العشرين، من حيث إننا نعرف الآن أنّ **جميع** القوى تحكمها تناظراتٌ معيارية، وتُدعى طرقُ وصف هذه التناظرات بـ**النظريات المعيارية** (أو **نظريات المعيار**).

ذكرنا من قبل أنّ جميع الجسيمات يتمّ وصفها في ميكانيك الكمّ بواسطة موجات، وذلك من خلال توابعها الموجية. تتحدّد المعلوماتُ

عن اندفاع الجسيم عن طريق معرفة الطول الموجي للموجة وعن طاقته من خلال التواتر، حيث يتمّ هذا عبر الصيغتَين: $E = hf$ (أي: تساوي الطاقةُ حاصلَ جداء ثابت بلانك بالتواتر) و $p = h/l$ (أي: يساوي الاندفاعُ حاصلَ قسمة ثابت بلانك على الطول الموجي). رأينا كذلك أنه بالرغم من وجود كامل المعلومات عن الطاقة والاندفاع دوماً في التابع الموجي وبالتالي إمكانية استخراجها منه، فإننا عاجزون عن قياس التابع الموجي مباشرةً بسبب اشتماله على أعدادٍ عقدية ليس لها معنى كمقادير فيزيائية قابلة للملاحظة والمراقبة. قدّم ماكس بورن الحجّةَ في أنّ (مربّعَ) طويلةِ - أي سعةِ - التابع الموجي - المعبِّرَ عن **الاحتمالية** - وحدَه هو ما يمكن قياسه فعلاً.

لنتفحّص هذه الخاصيّة الخفيّة للتابع الموجي للإلكترون بتفصيلٍ أكبر. لنأخذ إلكتروناً محتجَزاً ضمن حجرة كبيرة، وبالتالي يملأ تابعُه الموجي كاملَ أرجاء الحجرة. تتمثّل إحدى طرق تصوّر التابع الموجي الكمومي للإلكترون في تخيّل أنه لدينا آلة خاصة - اسمها «كاشف شركة الأوج للتابع الموجي» - قادرةٌ على قياسه بكامل معلوماته. للكاشف قرصٌ دائري - هو **المعيار** - مع مؤشّر سهمي يشير إلى أرقامٍ على القرص. تشابه الأرقامُ على القرص تلك التي على الوجه الأمامي لساعةٍ ذات عقارب، أمّا المؤشّرُ السهميُّ الدليلُ فهو كالعقرب الطويل في الساعة. لكاشف الأوج أيضاً مؤشِّرٌ ضوئيٌ يلمع ببريقٍ ساطع أو بشكلٍ باهت وخافت. ونحن نفترض (خيالياً) بأننا مع هذا الكاشف قادرون على قياس كامل التابع الموجي للإلكترون - الشيء الذي رمزنا له بـ $\psi(x, t)$ في الفصل السابق - من خلال تجوالنا في المكان (والزمان) والنظر إلى المؤشِّر السهمي على القرص وإلى المؤشّر الضوئي.

يعبّر سطوعُ لمعانِ المؤشّر الضوئي في جهاز كاشف الأوج عن احتمال إيجاد الإلكترون في نقطةٍ ما من المكان والزمان، أي عمّا

عرّفه ماكس بورن كمربّع الطويلة (المطلقة) للتابع الموجي $|\psi(x, t)|^2$. إنّ احتمالَ وجود الإلكترون في مكان ما من الفضاء هو مقدارٌ قابلٌ للملاحظة فيزيائياً عبر التجارب، وفي حالتنا التخيّلية يزداد بريقُ لمعانِ المؤشّر الضوئي في الأماكن التي يكبر احتمالُ وجود الإلكترون فيها. يوافق إذاً مقدارُ سطوع المؤشّر الضوئي شيئاً يمكن قياسه في الطبيعة، وليس أمراً تُخفيه الأخيرة عن أنظارنا.

مع ذلك هناك أمرٌ آخر يخبرنا الكاشف به، ألا وهو الرقم الخاص على القرص الذي يشير إليه المؤشِّر السهمي؛ وندعوه بـ**طور** التابع الموجي. بالرغم من أنّ كاشفنا يستطيع قياسَ الطور، فإنّ طور التابع الموجي الكمومي هذا **ليس** مقداراً قابلاً للملاحظة مباشرةً بأيّ طريقةٍ أخرى. هذا مع العلم بأنّ المعلومات القابلة للملاحَظة والمراقبة حول طاقة الإلكترون واندفاعه تكون متضمَّنةً في الطور.

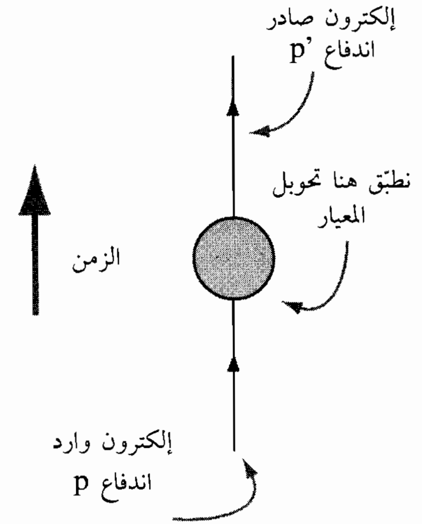
الآن دعونا نقف في مكانٍ ما من الحجرة، وليكن على سبيل المثال موضعاً يسطع عنده المؤشّرُ الضوئي ببريقٍ متوسّط الشدّة بحيث تكون قيمة احتمال وجود الإلكترون هناك قيمةً معقولةً وغير معدومة. ننظر إلى المؤشِّر فنرى أنّ السهم يدور حول القرص - فتتغيّر قيمته من 12 إلى 3 ثم 6 فـ 9 وأخيراً يعود إلى 12 - متمِّماً دورةً كاملة حول القرص مرّة كل ثانية. يعني ذلك أن **تواترَ** التابع الموجي للإلكترون يبلغ $f = 1$ دورة في الثانية، ومنه نستطيع استنتاجَ طاقة الإلكترون باستخدام صيغة ماكس بلانك $E = hf$. لنفترض أيضاً أنه لدينا عدة كواشف مصفوفة على طول خطّ مستقيم في الفضاء. ننظر في اللحظة الزمنية نفسها إلى جميع المؤشِّرات السهمية على كلٍّ من أقراص الكواشف المختلفة، فنرى السهمَ الأول يشير إلى العدد 12 على القرص، بينما يشير السهم الثاني إلى العدد 3، والسهم التالي إلى 6، أمّا السهم الذي يليه فيشير إلى 9، وأخيراً يشير السهم التالي إلى العدد 12 مرة أخرى. تَتِمّ هذه الدورة الكاملة خلال مسافةٍ

معيّنة، ولنقُل إنها بلغت 10 أمتار مثلاً. عندها نكون قد قمنا بقياس طول الموجة للتابع الموجي للإلكترون، ووجدناه مساوياً لـ 1 = 10 أمتار، وهذا يسمح لنا بتحديد قيمةِ الاندفاع (في الحقيقة قيمة المركبّة الشعاعية للاندفاع الموازية للخطّ المستقيم الذي اخترناه) على أنها مساوية لـ p = h/l. يجب أن نتذكّر أنّ طورَ التابع الموجي - بالرغم من أنَّ جهاز كاشف شركة الأوج التخيّلي الذي لدينا قادرٌ على قراءته - هو مقدارٌ مخفيٌ عنّا فعلياً في العالَم الحقيقي.

يسأل طالبٌ شابٌ لامع يجلس في الصف الأول فيقول: «يبدو كلُّ هذا غريباً بالنسبة إلي. ماذا سيحدث مثلاً إذا غيّرنا بطريقةٍ ما التابعَ الموجي للإلكترون من **دون** تغيير قيم الاحتمال الملاحَظة في جميع النقاط من المكان والزمان؟ فلو جعلنا طورَ تابعِ الإلكترون الموجي غيرَ القابل للملاحظة مختلفاً تماماً عمّا كان عليه، لكنْ مع إبقائنا قيمةَ الاحتمال كما كانت في كلّ نقطة من الفضاء. عندها كيف يمكن للوضع الجديد أن يمثّل حالةً فيزيائيةً مختلفةً للإلكترون مادمنا لا نقدر على ملاحظةِ أيِّ شيءٍ يخصّه مختلفاً عمّا كان عليه؟ أم أنّ الحالةَ الفيزيائية الجديدة هي نفسها الحالة القديمة؟ هل يمكن لهذا الأمر أن يمثّل تحويلاً تناظرياً للإلكترون لم يخطر على بالنا من قبل؟» إنّ هذا الطالب يفكّر بلغة التحويلات التي تُبقي الأشياء على حالها أي بدلالة التناظر: الموضوع الرئيس لهذا الكتاب، لذا فهو من وجهة نظرنا يستحق فعلاً علامة امتياز.

وهكذا فلنتخيّل أننا بطريقة ما نستطيع إجراءَ تغييرٍ على التابع الموجي للإلكترون يُبقي سطوعَ المؤشّر الضوئي على حالتِه نفسِها في كلّ نقطة من الزمان والمكان، وبالتالي لن تتأثّر القيمُ الملاحَظة لاحتمال وجود الإلكترون، وإنْ كنّا نغيّر من التابع بحيث يشير السهم (أو الطور) اعتباطياً إلى أيّ قيمةٍ على القرص عند حركتنا في المكان والزمان. إذا وقفنا ثابتين فسوف يدور السهم باستمرار خلال الزمن،

ولكنْ لا تواترَ منتظماً لحركته الآن: فهو يتحرّك ببطء وبشكلٍ أملس من الرقم 12 إلى 1، ثم يكمل حركته الملساء ولكنْ بشكل معاكس لجهة عقارب الساعة عائداً إلى الرقم 9، ثم يتوقّف ويتقدّم بعدها باتجاه عقارب الساعة إلى الرقم 6، يليه 8 وهكذا. يبدو أننا غيّرنا حالةَ الإلكترون الكمومية بشكلٍ محسوس، إذ من الواضح الآن أنه ـ أي الإلكترون ـ لا يمتلك تواتراً محدّداً وبالتالي لا طاقةَ معرَّفةً تماماً له، وهذا بالرغم من أنّ سطوع المؤشّر الضوئي بقي كما كان سابقاً. يبقى ضوء المؤشّر إذاً ـ مع تجوالنا ضمن الحجرة ـ ساطعاً في الأماكن التي يزداد فيها احتمال إيجادنا للإلكترون، وخافتاً حيث من غير المحتمل إيجاده، وذلك تماماً كما كان عليه الحال قبل إجراء التغيير.



الشكل 24: يقتضي إجراءُ تحويل معياري على التابع الموجي للإلكترون ذي الاندفاع p تغييراً لقيمة طول الموجة للتابع الموجي، وبالتالي يصبح الاندفاع بقيمةٍ مختلفة p'. في غياب حقل المعيار لا يمثّل هذا التحويل **تناظراً**، لأنّ الحالة النهائية للإلكترون مختلفة عن حالته الابتدائية.

بما أنّ تأثيرَ هذا التغيير في التابع الموجي للإلكترون لا يشمل سوى سلوك المؤشِّر السهمي للكاشف ـ أي القسم «المعياري» من الكاشف ـ فقط، فإننا ندعو هذا التغيير بـ**تحويل معياري (تحويل المعيار)**. ولكن مع إجراء هذا التغيير، لا يبدو ظاهرياً أنّ هناك شيئاً قد بقي صامداً ولامتغيّراً في هذه الحالة؛ فمن البديهي أنَّ ما فعلناه هنا ليس تناظراً للحالة الكمومية الأصلية، بل بالأحرى يظهر أنه قد تمَّ خلق حالةٍ كمومية جديدة بقيم ملاحَظةٍ مختلفةٍ للطاقة والاندفاع[3]. نبيّن هذا في الشكل 24، حيثً غيّرنا فقط الطولَ الموجي للإلكترون الوارد أي المسافة في المكان التي تمسح خلالها أسهمُ الكواشف المتتالية دورةً كاملةً على وجه القرص. وبشكلٍ بديهي لابدّ أن نتوقّع أن يسبِّب هذا تغييراً فيزيائياً لاندفاع الإلكترون بعد إجراء التحويل، وبالتالي كيف يمكن لهذا التحويل أن يمثّل تناظراً؟

---

(3) نلفت الانتباه بشكلٍ خاصّ إلى أنّ **عامِل الطور العقدي** هو مجرّد أسّ مثل $e^{i\theta}$ حيث θ عدد حقيقي، ولهذا الأسّ طويلة مساوية للواحد أي $|e^{i\theta}|^2 = 1$. وهكذا عندما نضرب التابع الموجي للإلكترون بهذا **العامل**، فهذا يعني إجراءَنا للتحويل $\psi (x\text{-}1>^{\rightarrow}, t)$ $\rightarrow e^{i\theta} \psi (\vec{x}, t)$ الذي لا يغيّر من طويلة (سعة) التابع الموجي للإلكترون، وبذلك لا يؤثّر على قيم الاحتمال المُقاسة. يكمن مفتاح اللاتغيّر المعياري **الموضعي** في سماحنا للزاوية التي تظهر في عامِل الطور أن تصير **تابعاً حقيقياً** للمكان والزمان $\theta (\vec{x}, t)$. يمكن لذلك أن يغيّر قيمتَي الطاقة والاندفاع الظاهريّتَين في التابع الموجي للإلكترون، إذ يعني هذا أنه لو كان إلكتروننا باندفاع $\vec{p}$ وطاقة E فمن السهل إيجاد تابع $\theta (\vec{x}, t)$ بحيث يؤدي ضربنا التابع الموجي بعامِل الطور $e^{i\theta(\vec{x}, t)}$ إلى أن نحصل على قيمتين **جديدتين** كيفيَّتَين نريدهما للاندفاع $\vec{p}'$ وطاقة E'. على سبيل المثال إذا أخذنا الخيار البسيط $\theta = ax\text{-}bt$ فإننا نجد $e^{i(kx-wt)} \rightarrow e^{i(ax-bt)}\, e^{i(kx-wt)} = e^{i(k'x-w't)}$ حيث $k' = k+a$ و$w' = w+b$. لقد غيّرنا بشكلٍ ملموس العدد الموجي والتواتر بطريقة كيفية، وهكذا حوّل الضّربُ بطور عقدي معتمدٍ على المكان والزمان الإلكترونَ القديم ذا الاندفاع $\vec{p}$ وطاقة E إلى إلكترونٍ جديد بقيمتَين مختلفتَين كيفياً للاندفاع $p' = hk'$ وطاقة $E' = hw'$. من الواضح أنّ هذا لا يمثّل تناظراً للحالة الأساسية، بل إنّه بالأحرى قد أدّى إلى خلق حالةٍ جديدة بقيمتَين مختلفتَين قابلتَين للملاحظة للاندفاع والطاقة.

لكنْ لنفترض الآن أنّ هناك جسيماً كمومياً آخر في العالَم يتفاعل ويتآثر مع إلكتروننا. ولنفرض بالإضافة لذلك أنه عندما نغيّر الطول الموجي للإلكترون أو تواترَه، فإننا نخلق في الوقت نفسه حالةً كمومية تحوي أيضاً هذا الجسيم الكمومي الجديد. لهذا الجسيم الجديد تابعٌ موجي هو عبارة عن حقلٍ في المكان والزمان يتحرّك خلاله الإلكترون، وأثناء ذلك يتفاعل هذا الأخيرُ مع الحقل المذكور الذي نسميه حقل المعيار. فما هو أثر هذا الحقل الجديد الإضافي؟

عندما نتفّحص كاشفَ شركة الأوج للتابع الموجي، فإننا نرى عليه مفتاحاً كهربائياً صغيراً يسمح ـ عندما ننقره ـ بكشف أثر حقل المعيار. نضع ذلك المفتاح بوضعية التشغيل ونراقب من جديد التابعَ الموجي للإلكترون مع طوره المتغيّر. من الوهلة الأولى يبدو لنا أنّ السهم لا يزال يتحرّك بالطريقة العشوائية نفسها، أي يدور من 12 إلى 1 ثم يعكس اتجاهَه ليتحرّك بعكس عقارب الساعة وبشكلٍ أملس فيرجع إلى وضعِ الرقم 9 ثم يتوقّف ويعود متحركاً باتجاه عقارب الساعة نحو وضعِ الرقم 6 ثم 8 وهكذا. ولكنْ مع النظر بشكلٍ أقرب فإننا نلاحظ أنّ القرصَ نفسه يدور أيضاً! وهكذا عندما يغيّر السهمُ موضعَه من الساعة 12 إلى **موقع (وضع)** الساعة 1، فإنّ القرصَ نفسه يكون قد دار بمقدار خطوتين إلى الوراء، وبالتالي يكون السهمُ قد عاد يشير إلى الرقم 3 على القرص تماماً كما كان يفعل سابقاً. كلا القرص والمؤشّر السهمي الآن هما في وضعَين (موقعَين) مختلفين، ومع ذلك تُعطي القراءةُ من جديد الرقم 3! ومع استمرارنا بمراقبة الإلكترون فإننا نرى السهمَ يتحرّك نحو موقع الساعة 9، ولكنّ القرصَ يدور أيضاً إلى الأمام بمقدار خمسة أثلام، وبالتالي يعود السهم مشيراً إلى الرقم 6 على القرص تماماً كما كان يفعل قبل تغيير التابع الموجي للإلكترون. عندما ننظر الآن إلى الرقم الفعلي على

القرص الدوّار الذي يشير إليه السهم، فإننا نرى أنه يتغيّر من 12 إلى 3 ثم 6 فـَ 9 ويعود إلى 12 متمِّماً دورةً واحدة كاملة خلال ثانية واحدة! يبقى تواترُ الإلكترون f ـ عندما نشمل في اعتباراتنا حقلَ المعيار ـ نفسَه تماماً كما كان من قبل: 1 دورة في الثانية، وبالتالي تظلّ طاقة الإلكترون مساويةً تماماً لقيمتها السابقة والمعطاة بعلاقة بلانك: $E = hf$.

نبيّن هذا الأمرَ تخطيطياً في الشكل 25. يمكننا مع تضمين جسيم المعيار الجديد الإبقاءُ على قيمتَي الطاقة والاندفاع الواردتَين الأصليتَين، بالرغم من تلاعبنا بقيمة الطور غير القابلة للملاحَظة في التابع الموجي للإلكترون. وهكذا يعني لفظُ **المعيار** أنّ التحديدَ الفعلي للاندفاع الفيزيائي للإلكترون يحتاج إلى وجود حقلِ معيارٍ يسمح بالمعايرة والتدريج. إنّ التابعَ الموجي للإلكترون مع حقل المعيار هما اللذان يسمحان ـ سويةً وبشكلٍ حصري ـ بإنتاج مقدارَين إجماليَّين للاندفاع والطاقة بمعنى فيزيائيٍ مقبول أي قابلٍ للملاحظة والتقدير.

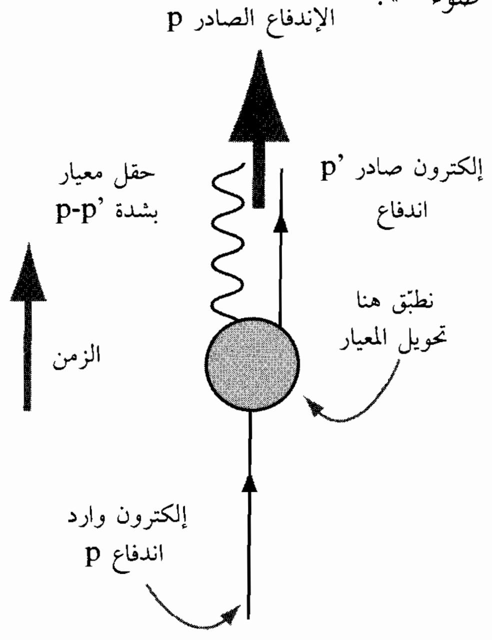
لقد تمّ تصميُم وجود الحقل الجديد المتآثِر مع الإلكترون لـ**يعوّض** عن التغيّر في التابع الموجي لإلكتروننا، بحيث يعيد قيمةَ الاندفاع الكلي للإلكترون بعد أن نضمّنه أثرَ حقل المعيار إلى قيمة الاندفاع الأصلية لإلكتروننا الوارد الأصلي[4].

(4) يغيّر هذا التآثر المعياري الجديد الطاقةَ الكلّيّة للإلكترون من خلال تزويده بطاقةٍ كامنة إضافية، وبالتالي تتغيّر الطاقة الكليّة للإلكترون فتصبح: $E = \hbar\omega + e\phi$. بما أنّ النسبية الخاصة تخبرنا بأنّ قيمتَي الطاقة والاندفاع ـ عند إجراء معزّزٍ ما ـ تختلطان وتمتزجان معاً (كما يفعل المكان والزمان)، فإنه يتوجّب بالتالي أن نُدخلَ شيئاً جديداً يغيّر من الاندفاع بطريقة مماثلة: $\vec{p} = \hbar\vec{k} + e\vec{A}$. يسلك هذان الكائنان الجديدان $(\phi, \vec{A})$ مسلكَ $(t, \vec{\chi})$ عند =

كلّ هذا في الواقع مفهومٌ شبحي وخيالي، لأنّ كواشفَ شركة الأوج للتوابع الموجية غير موجودة في الحقيقة. نؤكّد هنا أنّ حقلَ المعيار ليس مقداراً قابلاً للملاحَظة؛ والتابع الموجي للإلكترون ليس كذلك بدوره. لقد قمنا بإجراء تحويلٍ غير قابل للملاحظة على كائنَين غير قابلَين للملاحظة! وحتى لو كانت هذه الأشياء قابلةً للملاحَظة بشكلٍ مباشر، فإنّ ما عرضناه يخبرنا بأنّ معنى الإلكترون ـ في حدّ ذاته ـ وهويته ليسا مطلقَين، فالإلكترون يكافئ ـ عبر إجراء تحويلٍ معياري ـ إلكتروناً آخرَ بطولٍ موجيّ مختلف مع حقل المعيار الذي يعيد الاندفاعَ الكلّي إلى قيمته الأصلية. لقد تمّ مزج وخلط الإلكترون مع حقل المعيار ليكوّنا كينونةً واحدةً متناظرة ذات معنى. ويبقى السؤالُ عمّا إذا كنّا قد قمنا فعلاً بشيءٍ ما على الإطلاق أم أننا كنّا نحاول إخفاء الحقيقة عبر بعض اللُّعب والوسائل الملتوية والخادعة؟ ما هو هذا الحقل المعياري الشبحي؟ هل هناك محتوى قابلٌ للملاحظة يوافق هذا التناظرَ الجديد والغريب؟

= إجراء تحويلات لورنتز، وندعو f بـ**الكمون السلّمي** وA بـ**الكمون الشعاعي**. أمّا الثابت e فهو عاملٌ ضربيٌ يُدعى بـ**الشحنة الكهربائية**، وهو يحدّد مدى قوّة شعور الإلكترون بوجود الكمونَين السلّمي والشعاعي الجديدَين. الآن عندما نضرب التابع الموجي لإلكتروننا بعامِل الطور مسبّبين بذلك انسحاباً لقيم التواتر والشعاع الموجي إلى قيم جديدة $\omega \rightarrow \omega'$ و $\vec{k} \rightarrow \vec{k}'$، فإننا نستطيع في الوقت نفسه إجراءَ انسحابٍ على قيم الكمونَين السلّمي والشعاعي الجديدَين. يعني ذلك أنّ التحويل المعياري الإجمالي يتضمّن إجراءنا ما يأتي: (1) نضرب التابع الموجي للإلكترون بالطور: $e^{i(kx-\omega t)} \rightarrow e^{i\theta(x,t)} e^{i(kx-\omega t)} = e^{i(k'x-\omega' t)}$، و(2) ثم نرى أنّ $k \rightarrow k' = k + a$ و$\omega \rightarrow \omega' = \omega + b$، لكننا (3) نجري انسحاباً للكمون السلّمي $\emptyset \rightarrow \emptyset - \hbar b/e$ و(4) للكمون الشعاعي $A_x \rightarrow A_x - \hbar a/e$. نجد بعدها أنه عند إجراء جميع هذه التحويلات معاً، فإنّ قيمةَ الطاقة الكلّيّة تبقى ثابتة لا تتغيّر: $E = \hbar\omega + e\emptyset \rightarrow \hbar\omega' + e\emptyset - \hbar b = \hbar\omega + e\emptyset = E$. إضافةً إلى ذلك يبقى الاندفاع الكلّي بدوره ثابتاً لا يتغيّر عند إجراء جميع تلك التحويلات معاً: $\vec{p}_\chi = \hbar\vec{\kappa} + e\vec{A}_\chi \rightarrow \hbar k' + e\vec{A}_\chi - \hbar a = \hbar k + e\vec{A}_\chi = \vec{p}_\chi$.
تُدعى مجمل هذه التحويلات معاً بـ**تحويل معياري موضعي**.

نعم، هناك هذا الشيء: وعندما خلق التناظرَ المعياري، قال اللهُ: «ليكن ضوء(*)».



الشكل 25: يُبقي إجراءُ تحويلٍ معياري على التابع الموجي للإلكترون ـ مع وجود حقلِ معيار ـ الطاقةَ الكلية والاندفاعَ الكلي للمنظومة كما كانا تماماً. يمثّل التحويلُ الآن عمليةَ تناظر. إنّ التابع الموجي للإلكترون هو دوماً توليفةٌ تمزج التابعَ الموجي الرياضياتي البحت بحقلِ المعيار.

إجرائية الإشعاع الكمومية (الإلكتروديناميك الكمومي)

تقود نظرية المعيار مع تناظرها المخفي إلى نتائجَ عميقة: إذا ما أُعطي الإلكترون «رفسةً» فيزيائية، أي إذا ما خضع لـ**تسارعٍ** ما،

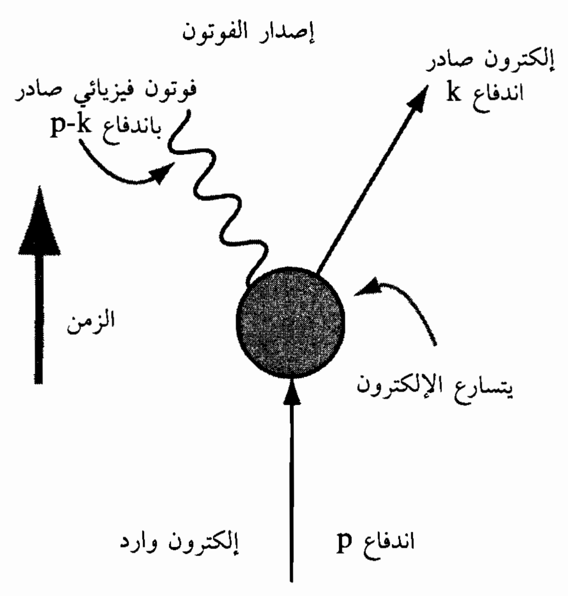
(*) اقتباس من **الكتاب المقدس**، «سفر التكوين»، «الإصحاح 1»، الآية 3: «وقال الله ليكن نورٌ فكان نورٌ».

فإنّ الحقل المعياري نفسه يتمّ إصداره بشكل جسيم كمومي. من أجل إبداء ذلك للعيان، لنفترض فعلاً أننا أعطينا إلكترّوننا الابتدائي ركلةً فيزيائية، فإذا كان اندفاع الإلكترون الابتدائي p وركلناه إلى حالةٍ جديدة باندفاع k، فإننا نُنتج أيضاً «جسيماً معيارياً» باندفاع p-k. لقد غدا حقلُ المعيار ـ ذاك الشيء الشبحي الذي كان ملازماً لا غير للإلكترون سابقاً ـ كياناً فيزيائياً حقيقياً الآن، ينفصل عن الإلكترون عند تسارع الأخير ويتمّ إشعاعُه كجسيم كمومي فيزيائي خارجاً إلى الفضاء. في الواقع إنّ حقلَ المعيارَ الآن هو موجةٌ منتشرةٌ لحقلَين، كهربائي ومغناطيسي، (قابلَين للقياس) باندفاعٍ وطاقةٍ خاصَّين به (تماماً كما تصوّر ماكسويل الضوء)، ويمكن كشفهُ على بعد كفوتونٍ حقيقي. يبدو إذاً كما لو أنّ الإلكترون ـ عند خضوعه لتسارعٍ ما ـ قام بخضّ الحقل المعياريّ الشبحيّ المحيط به؛ ومن وجهةَ نظر مراقِبٍ بعيد يكون الإلكترون قد أشعّ وأصدرَ جسيماً جديداً يمكن كشفه فيزيائياً، وهذا الجسيم الجديد هو ما دعوناه بـ**الفوتون** (انظر الشكل 26).

يَصدر الضوء إذاً عن الشحنات المتسارعة. وفي الحقيقة يحدث هذا الأمر مراراً في عملياتٍ فيزيائية عديدة مثل **بعثرة** إلكترون عن نواة ذرّيّة أو عن ذرّة أو عن إلكترون آخر، ويمكن مراقبة هذه العمليات بسهولة في المخبر. عند الطاقات المنخفضة جداً، يَصدر الضوء بالطريقة التي تُشِعّ فيها إلكتروناتُ نار المخيّم فوتوناتٍ. تُشِعّ الإلكتروناتُ المتسارعةُ الأمواجَ المكرويةَ التي تسخّن فنجانَ القهوة الموضوعَ في فرن الأمواج المكروية (الميكروويف)، كما تُشِعّ الأمواجَ التي تنقل أخبارَ المساء إلى غرف الجلوس في منازلنا أو تجعل الشمسَ تصدر أشعتها.

مخطّطات فاينمان

يمكن جعلُ ديناميك نظريات المعيار مثل الكهرمغناطيسية (أو ـ من وجهة النظر نفسها ـ أيّ تفاعلات أخرى ضمن ميكانيك الكمّ) أكثرَ وضوحاً بدلالة **مخطّطات فاينمان**. ليست هذه المخططات مجرّد صورٍ عن عملية فيزيائية ما فحسب، بل إنها تخبرنا كذلك بكيفية حساب الخرج الكمومي ـ أي احتمال حصول إجرائية ما ـ تماماً، شريطةَ أن تكون شدّات التفاعلات معروفةً وألاّ تكون كبيرةً جداً. يمكننا توضيحُ كيفيةِ حدوث هذا الأمر مفاهيمياً. لنتناول إجرائيةً نمطية: تبعثر إلكترونَين بعضهما عن بعض بوساطة القوة الكهرمغناطيسية. تبيِّن مخطّطاتُ فاينمان كيفيةَ حدوث هذه العملية على المستوى الكمومي.



الشكل 26: يتسارع الإلكترون فيتمّ إشعاع فوتون نحو الفضاء حاملاً طاقةً واندفاعاً قابلَين للقياس.

تمّ أول مرة اقتراحُ شكل قانون القوة الكهرمغناطيسية بين جسيمَين مشحونَين في أواخر القرن الثامن عشر على يد شارل ـ أوغسطين دو كولون (Charles-Augustin de Coulomb)؛ وهو يشبه إلى حدّ كبير ولافتٍ للنظر قانونَ نيوتن للثقالة. إنّ القوةَ بين جسيمَين مشحونَين ساكنَين تتبع قانونَ قوةٍ مربّعةِ المقلوب. تكون **الطاقة الكامنة** الناجمة عن القوة الكهرمغناطيسية بين شحنتَين كهربائيّتَين ساكنتَين q_a، q_b تفصل بينهما مسافة R مساويةً لـ $k\, q_a\, q_b / R$ حيث $k = 9{,}0 \times 10^9$ وحيث الشحنتان مقدَّرتان بالكولون. إنّ الشحنة الكهربائية للإلكترون سالبةٌ وتبلغ قيمتها:

$$q_{eletron} = -e = -1{,}6\text{x}10^{-19}\ \text{Coulombs}$$ (كولون).

ولكنْ بما أنّ الجسيماتِ المشحونةَ عموماً تتحرّك بسرعة (غالباً بسرعاتٍ قريبة من سرعة الضوء)، فإنّ فائدة نظريةِ كولون الساكنةِ محدودةٌ لو حاولنا استخدامها في وصف الجسيمات المشحونة. تسمح لنا نظريةُ ماكسويل التقليدية (الكلاسيكية) الكاملة بتناول حركة الإلكترون في أوضاع تتضمن سرعات قريبةٍ من سرعة الضوء، ولكنها تعامل الإلكترونَ كجسيم تقليدي (كلاسيكي) نقطي، بينما تعامل الضوءَ كموجة تقليدية (كَلاسيكية). ولكننا نعرف أنّ كلا الإلكترون والفوتون هما جسيمان كموميّان يتصرّفان كما لو كانا جسيماً وموجةً في الوقت نفسه. وهكذا صار من الضروري إيجادُ توصيفٍ كامل للتفاعل بين الإلكترونات والفوتونات، وهو التفاعل الذي ربّما يكون أهم التفاعلات الأساسية في جميع مجالات الفيزياء والبيولوجيا والكيمياء، بحيث يتضمَّن ذلك التوصيف بشكلٍ صحيح جميعَ قوانين الفيزياء في نظرية واحدة. تُعرف النظريةُ الحديثة الكمومية والنسبويةُ بشكلٍ كليّ للإلكترونات المتفاعلة مع الفوتونات باسم الإلكترودايناميك الكمومي (كيو إي دي QED)، ولقد وَجدت هذه

النظريةُ الحلَّ الكاملَ والجميلَ للمسائل المذكورة أعلاه. في الحقيقة تُعتبَر الـ QED أكثرَ نظريةٍ تمّ اختبارها - في دقّتها وفي شمولها - في كلّ مجالات الفيزياء وربّما في كل مجالات المعرفة البشرية.

تمّ حلُّ مسألة صياغة نظرية الـ QED وجعلها نافعةً من قبل جوليان شفينغر (Julian Schwinger) وريتشارد ب. فاينمان (Richard P. Feynman) وسين - إيتيرو توموناغا (Sin-Itiro Tomonaga) بشكلٍ مستقلّ خلال أواخر الأربعينيات من القرن العشرين، وحازوا بفضل هذا العمل مشتركِين على جائزة نوبل عام 1963. تميّزت مقاربةُ شفينغر بالقوة الرياضياتية العمياء. لقد طوّر شفينغر تقنياتٍ عديدةً فعّالة ومعقّدة تُشكّل اليوم أساسَ مجمل نظريات الحقل الكمومي، وحسّنت من فهمنا للنظرية التقليدية (الكلاسيكية) عن الكهرمغناطيسية. يعود الفضلُ في إنجاز القسم الأكبر من تطوير الإشعاع الكهرمغناطيسي الضخم الناجم عن آلاتٍ ومعدَّاتٍ متقدّمة مثل منابع الضوء المواقِت (السِّنكروترون (Synchrtoron)) إلى عمل شفينغر. تُعَدّ منابعُ ضوء السِّنكروترون مصادرَ لأشعةِ غاما شديدةٍ يمكنها أن تسمح بتحليل أمر الاعتمادِ السريع على الزمن لعملياتٍ دقيقةٍ في التفاعلات الكيميائية أو تحليل بنى المَعادن وكيانِها أو خصائصَ النوى النادرة، بل إنها تعطينا القدرة على تحليل الفيزياء ضمن مُفاعلٍ اندماجي. كان شفينغر أوّل من قام بحساب بعض الخواص الكهرمغناطيسية الدقيقة والحذقة للإلكترون، وحصل على أوّلِ نتيجةٍ درامية للتصحيحات الكمومية على الحقل المغناطيسي لإلكترون مدوِّم (وتُدعى بالعزم المغناطيسي غير السويّ).

تبنّى فاينمان من جهةٍ أخرى مقاربةً لمسألة الـ QED أكثر توافقاً مع الحدس، وابتكر طريقةً جديدةً تماماً من أجل حساب آثار ونتائج التفاعلات الكمومية، وهي التي غدت التقنيةَ الأكثر إيضاحاً من بين

التقنيات المستخدَمة عملياً في جميع مجالات الفيزياء اليوم. نُمثّل هنا وبشكلٍ بياني حيٍّ العمليةَ الفيزيائية من خلال استخدام مخطّطات فاينمان التي تمثّل أيضاً الحساباتِ الكموميةَ الواجبَ إجراؤها؛ هذا مع العلم أننا نستطيع دوماً تمثيل العملية من خلال هذه المخطّطات حتى لو لم نقدر على حساب النتيجة. لقد كتب أحدُ طلاب مرحلة الدراسات العليا في جامعة كورنيل (Cornell) ـ حيث طوّر فاينمان تقنيتَه ـ في تعليقٍ له يقول: «في كورنيل، حتى البوّاب يستعمل مخططات فاينمان».

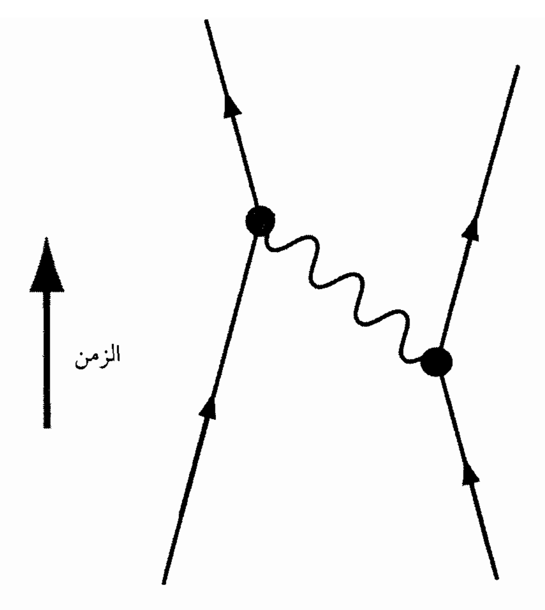
لنأخذ إلكترونَين يتصادمان فيتبعثر كلٌّ منهما عن الآخر بسبب القوة الكهرمغناطيسية. نمثّل هذه العمليةَ بمخطّطٍ لفاينمان في الشكل 27. تكمن الفكرةُ الرئيسة هنا بأنّ إجرائيةَ التبعثر الكمومي تتحدّد بواسطة شيءٍ يُدعى مصفوفة ـ T (مصفوفة الانتقال)، حيث يمكننا من خلالها حسابُ احتمالِ حصولِ العملية عبر تربيع طويلتها المطلقة $|T|^2$. ترتبط مصفوفةُ ـ T مباشرةً بالطاقة الكامنة الكلّيّة لزوج الإلكترونَين عندما يبلغان نقطةَ الاقترابِ الأعظمي، تماماً كما في الصيغة التي كتبناها أعلاه عن الحالة الموافقة لذلك في النظرية التقليدية (الكلاسيكية).

في الحقيقة يُعيد مخطّطُ فاينمان الأكثر بساطةً اكتشافَ النتيجة القديمة التقليدية (الكلاسيكية) لكولون عندما يكون الإلكترونان ساكنَين فعلياً أو متحرّكَين بسرعةٍ ضئيلةٍ جداً. وبشكلٍ أعم يعامل هذا المخطّطُ الإلكتروناتِ والفوتونات على أنّها جسيماتٌ كمومية في حالةٍ حركيةٍ ما، ويمكن شرحُ كيفية عمله ـ بطريقة تقريبية ـ كما يأتي: يُصدر الإلكترون الأول فوتوناً بما يوافق اللاتغيّرَ المعياري عند تسارع الإلكترون أو ارتداده إلى الوراء. يتمثّل إصدارُ الفوتون بعاملٍ رياضياتي للشحنة الكهربائية q_a في مصفوفة ـ T. **ينتشر** الفوتون

الصادر نحو الإلكترون الآخر، ويتمثّل ذلك بالعامِل k/R. يقوم الإلكترون الثاني بعدها بـ**امتصاص** الفوتون، ويتمثّل ذلك بعامِل رأسِ إصدارٍ (زاوية إصدار) q_b. يوضع كلّ هذه الحدود مع بعضها البعض تكون قيمة مصفوفة ـ T الإجمالية في هذه الإجرائية هي: $q_a\ x\ (k / R)\ x\ q_b = kq_a\ q_b /R$، أي نتيجة كولون نفسها عن الطاقة الكامنة. نقول إذاً إنّ كمون كولون ـ وبالتالي القوة الكهرمغناطيسية ـ ينجم عن «تبادلٍ» لفوتونٍ بين الإلكترونَين.

إنّ هذا مثالٌ مبسَّط على وجه الإجمال فادح لكيفية عمل مخطّطات فاينمان من الناحية الفعلية. نستطيع مع ذلك باستخدام كامل أدوات مخطّطات فاينمان أن نقوم بحساب معدّل تبعثر حزمتَين إلكترونيّتَين تصطدمان بعضهما مع بعض، ويستطيع الفيزيائي التجريبي عندها مقارنة نتيجة حسابات المخطّطات مع النتائج المُقاسة في المخبر. وها نحن عند النقطة الحاسمة في هذا الأمر! يوجد تطابق ممتاز بين الحساباتُ النظرية وبين النتائج التجريبية. ورغم أننا بالتأكيد وضعنا جانباً جميع التفاصيل التقنية هنا كتدويم (سبين) الإلكترون مثلاً، فإننا نرجو أن يتمّ قبول صحة الجملة التي سنقولها الآن هنا وأن يتمّ منحها الثقة التي تستحقها: إنّ المخطّطات تعمل جيداً.

كما رأينا سابقاً، عندما نضع النسبية الخاصة مع ميكانيك الكمّ سويةً، فإنهما يتنبّآن بوجود المادة المضادة. لقد أنجز بول ديراك هذا الاكتشاف النظري الرائع عندما قام بحلّ مسألة الطاقة السالبة للإلكترونات في النسبية. ولاحظ كارل أندرسون البوزيترونَ ـ الجسيم المضادّ للإلكترون ـ بعد ذلك ببضع سنين. مع ذلك قام فاينمان بإعادةِ تفسيرٍ للمادة المضادة بدلالة اللغة الجديدة لمخطّطاته، وأعطانا طريقةً بديلةً لافتةً للنظر لإدراك ما تعنيه المادة المضادة فعلاً.



الشكل 27: مخطّط فاينمان الذي يصف تبعثر إلكترون ـ إلكترون. تنشأ القوة بين الإلكترونَين المسؤولة عن تفاعلهما من **تبادل** فوتونٍ في ما بينهما. كما وصفنا سابقاً يتمّ إصدارُ الفوتون من الإلكترون ـ عندما يتسارع هذا الأخير ـ بشكلٍ يقتضيه التناظر المعياري لتآثر الفوتون مع الإلكترون.

من أجل رؤية ذلك لنتأمّل الشكل 28. إنه يبيّن ما يمكن وصفه بعمليةِ **إفناءِ** لإلكترون وبوزيترون تُحولُهما إلى فوتون يخلق بدوره لاحقاً **كواركاً علوياً** وكواركاً **علوياً مضاداً**. يمكن حدوث هذه العملية في مصادِمٍ إلكترونيّ ذي طاقة عالية، وتحدث في هذه الأيام عمليةٌ مشابهةٌ له في تيفاترون الفيرميلاب حيث يكون الجسيمان الابتدائيان كواركاً وكواركاً مضاداً.

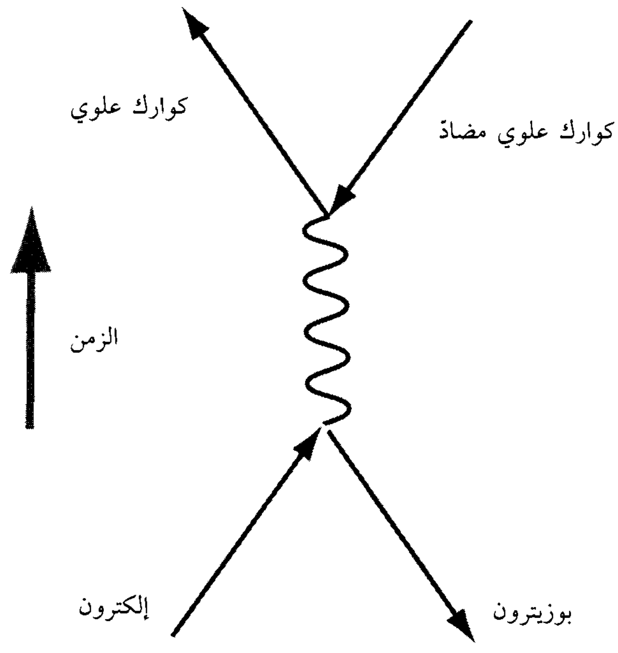
هناك مع ذلك وجهةُ نظرٍ أخرى نرى فيها الإلكترون بطاقته الموجبة مقترباً في الزمان والمكان من الحادثة التي يَصدر فيها

الفوتون ذو الطاقة الكبيرة. عند حدوث هذا الأمر يتسارع الإلكترون بشكلٍ كبير لدرجة تكفي لأن تصبح طاقته في الحقيقة سالبة ولأن يقلب وُجْهتِه فيبدأ رحلةً تراجعية **إلى الخلف في الزمن!** في الواقع تخيّل فاينمان المادة المضادّة بالطريقة الآتية: المادة المضادّة هي مادةٌ بطاقة سالبة تتحرّك نحو الوراء في الزمن! وبشكل مشابه، يصطدم الفوتون الصادر مع كوارك علوي بطاقةٍ سالبة آتٍ من المستقبل، فيكتسبُ الأخير طاقةً موجبةً ويتسارع، وهكذا يبرز الكوارك العلوي عائداً إلى المستقبل كجسيم بطاقةٍ موجبة! يمثّل كلّ هذا إعادةً جذريةً لتفسيرِ فكرة ديراك عن المادة المضادّة كثقوبٍ في بحر الفراغ ذي الطاقة السالبة.

إنّ وجهة نظر فاينمان هذه تبيّن بشكلٍ جليّ سببَ الحاجة إلى المادة المضادّة، حيث إنها تضمن عدمَ تحرّك أيّ شيءٍ بسرعةٍ أكبر من سرعة الضوء في العالَم الكمومي المُزوَّد بالنسبية الخاصة. إذ إننا لو أغفلنا إدراجَ الإلكترونات ذات الطاقة السالبة المتحرّكة بشكل تراجعي إلى الوراء في الزمن (أي الإلكترونات المضادّة)، لوجدنا أنّ الإشارات يمكن أن تنتشر تلقائياً من نقطةٍ إلى أخرى في الفضاء، ولكان مستطاعاً ـ من حيث المبدأ ـ لإصدارِ موجةِ جسيم في اللحظة $t=0$ أن يتمّ كشفُه بنفس تلك اللحظة في النجم البعيد ألفا سِنتاوري(*) (Alpha Centauri) (وهذا أمرٌ مرفوضٌ لا يمكن دعمه والدفاع عنه تجريبياً). لكن عندما نأخذ بعين الاعتبار الموجاتِ ذاتَ الطاقة السالبة التي تتحرّك إلى الوراء في الزمن، فإننا نجد أنها تحذف وتُبطل تماماً الإشارةَ التي كانت ستتحرّك بشكلٍ أسرع من

(*) نجمةٌ ثلاثية في تجمّع سِنتاورس (Centaurus)، يُعَدّ أوهنُها بريقاً (سِنتاوري القريب (Proxima Centauri)، أقربَ نجمٍ إلى الشمس، وهو يبعد عنها تقريباً 4,2 سنة ضوئية.

الضوء. ولو كان للجسيمات خصائصُ مختلفة ـ ولو قليلاً ـ عن خصائص مضادّاتها (كأن تكون قيم الكتل أوالشحنات أو التدويمات (السبينات) مختلفة قليلاً)، لما كان الحذفُ والإبطالُ السابقان مضبوطَين تماماً، ولَوُجدت إشاراتٌ تتحرّك أسرع من الضوء، وبالتالي لانتفت صلاحيةُ تناظر الـ CPT ولانتُهِك هذا التناظر!



الشكل 28: يُصدر الإلكترون الوارد ذو الطاقة الموجبة (المادة) فوتوناً ويقلب اتجاهه ليصير متجهاً **إلى الوراء في الزمن** مع طاقةٍ سالبة. نلاحظ هذه الحادثةَ كحالةِ اصطدامٍ بين إلكترون وإلكترون مضادّ يفني بعضهما بعضاً ليتحوّلا إلى فوتون. يصطدم هذا الفوتون مع كوارك علوي ذي طاقةٍ سالبة آتٍ من المستقبل (كوارك علوي مضادّ) ليُنتجا كواركاً علوياً بطاقةٍ موجبة يعود أدراجه متجّهاً نحو المستقبل. نلاحظ التآثر الإجمالي كحادثةِ اصطدامٍ بين إلكترون وبوزيترون ينجم عنها كواركٌ علوي وكواركٌ علوي مضادّ يمتلك كلاهما طاقةً موجبة.

تكمن القوةُ الحقيقية لمخطّطات فاينمان في أننا نستطيع بواسطتها حسابَ العمليات والإجرائيات الفيزيائية في النظريات الكمومية النسبوية وبدرجةٍ عالية من الدقة. ينجم هذا عمّا نسمّيه بـ**التصحيحات الكمومية** أو ما يُدعى بـ**الإجرائيات من المراتب الأعلى**. نبيّن في الشكل 29 التصحيحاتِ الكموميةَ من المرتبة الثانية على مسألة تبعثر إلكترونَين عن بعضهما البعض. تشمل هذه التصحيحات مجموعةً من المخطّطات التي يجب حسابُ كلَّ منها بالتفصيل ثمّ جمعُها معاً وإضافةُ المجموع إلى نتيجة المخطّط السابق في الشكل 27، فنحصل على النتيجة الكلّيّة النهائية لمصفوفة ـ T (إنّ مصفوفةَ ـ T هي ـ كما ذكرنا سابقاً ـ النسخة الكمومية عن الطاقة الكامنة بين إلكترونَين، وهي تعبّر عن عملية التبعثر وتصفها). يعطينا هذا كلُّه قيمةَ مصفوفة ـ T بدقةٍ من مرتبة 1/ 10000. ونستطيع بعدها الانتقالَ إلى المرتبة الثالثة من التصحيحات الكمومية الأعلى ومحاولةَ الحصول على نتائجَ متوافقةٍ أكثر مع التجربة. لا بأس من التنويه إلى أنّ حساباتِ المرتبة الثالثة تُعتبَر فائقةَ التعقيد ومُتعبةً جداً للفيزيائيين النظريين، بحيث لا يحاول حسابَها إلاّ الشجعان والأكثر نشاطاً بينهم.

مع كلِّ مرتبةٍ تالية في تعقيد مخطّطات فاينمان نحصل على مزيدٍ من إصدارات الفوتونات، ونعني بذلك مزيداً من الإلكترونات المُصدِرة أو الممتصّة للفوتونات ومزيداً من خطوط الانتشار للإلكترونات والفوتونات. يتحكّم عددُ رؤوس (زوايا) المخطّط بمقياس الكبر والقدّ ـ أي «رتبة العِظَم» ـ لأيِّ تصحيح معطى على الإجرائية الأساسية. يُساهم كلُّ رأسٍ (زاويةٍ) بعامِلٍ ضَربيّ لشحنة الإلكترون e، ولكنْ بما أنّ أيَّ مخطَّطٍ للتبعثر له على الأقلّ رأسان، لذا تتوالى حدودُ متسلسلة الحساب بقوىً متزايدة لـِ $\alpha = \frac{e^2}{4\pi \hbar c}$. تُوصَف هذه التجميعةُ الخاصّة من الثوابت الأساسية في الفيزياء بأنها «عددٌ لا بُعْدَ له»، فجميعُ الواحدات الفيزيائية (الأمتار، الثواني،

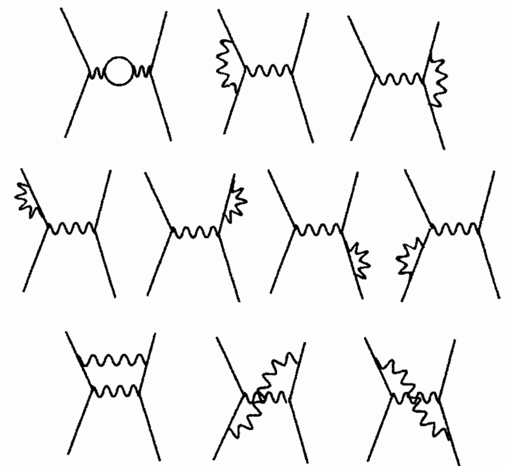
الكيلوغرامات) تحذف بعضها بعضاً فيها فلا يتبقّى إلاّ عددٌ رياضياتيٌ بحت قيمته 137/1. وهكذا وبما أنّ قيمة هذا العدد ـ لحسن الحظّ ـ صغيرة، فإنّ أيّ مجموعة إضافية من مخطّطات فاينمان سوف تحسّن من دقّة حسابِ مصفوفة ـ T بعامِلٍ يقارب الـ 100/1 لا غير. لقد تمّ حساب مخطّطات فاينمان ذات العُرى (الحلقات) من المرتبة الثالثة، وتمّ التحقّق من الـ QED تجريبياً بدقّة جزءٍ واحد من أصل 1210 جزء، وكان التوافقُ ممتازاً. لا توجد نظريةٌ أخرى في الفيزياء تمّ اختبارها لهذه الدرجة من الدقة.

نرى في الإجرائيات من المرتبة الثانية للشكل 29 ظهورَ ما يُعرَف بـ «مخطّطات العُرى». يحتوي المخطّط الأول على عروة تمثّل جسيماً وجسيماً مضاداً تمّ خلقهما في الوقت نفسه ثم عادا وقاما بإفناء بعضهما بعضاً. ويتضمَّن هذا المخطّط جرياناً عروياً لاندفاع الجسيم وطاقته. يجب أن نجمعَ في هذه الحالة كلَّ الاندفاعات والطاقات التي يمكن حدوثها في العُرى شريطةَ بقاءِ مقدارَي الاندفاعِ والطاقة الوارِدَين مساويَين لمقدارَيهما الصادرَين. تقدّم لنا عرى فاينمان مسألةً جديدة أقضّت مضاجعَ الفيزيائيين بأشكالٍ متنوّعة ولسنين عديدة، وهي تتمثّل ـ بشكلٍ مبسَّط ـ في أنه عندما نحسب المجاميعَ العُروية لبعض مخطّطات العُرى فإننا نحصل على نتيجةٍ لانهائية! يبدو أنّ العمليات التي نقوم بحسابها تصبح بلا معنى، وبالتالي يظهر أنّ النظريةَ بدأت بالتحطّم والاحتراق.

رغم ذلك فإنه مع ازدياد قيم الاندفاعات في العُرى تشغلُ العروة فيزيائياً حجماً في المكان والزمان أصغر فأصغر؛ بسبب العلاقة الكمومية العكسية بين الطول الموجي (الحجم) والاندفاع. وهكذا نستطيع في الحقيقة جمعَ الاندفاعات في العُرى لغايةِ مقياسِ اندفاعٍ عالٍ ـ أو بشكل مكافئ لغايةِ مقياسِ مسافةٍ صغيرٍ ـ نظلّ على ثقةٍ ببِنية نظريّتنا مادمنا لم نتجاوزه. أمّا من أجل طاقاتٍ واندفاعاتٍ

أكبر فستدخلُ حساباتِنا ارتياباتٌ أكثر فأكثر، لأننا نقوم بسبرِ قوى على مسافاتٍ أصغر فأصغر. من الممكن عند هذه المقاييس أن توجَد أنواعٌ جديدة ومختلفة من الظواهر لم نأخذها بعين الاعتبار.

تُخبرنا مخططاتُ العُرى في الحقيقة ـ إذا ما تمّ تفسيرها جيّداً ـ عن كيفية دراسة واختبار الفيزياء عند مقاييس مسافاتٍ مختلفة، كما لو كان لدينا مجهرٌ نظريّ مع قوّة تكبيرٍ قابلة للتغيير. إذا ما قمنا بقياس كتلة الإلكترون وشحنته الكهربائية عند مقياس مسافةٍ معروف، فإنه يمكننا التنبّؤُ الصحيح بقيمتَيهما عند طاقاتٍ أعلى أو عند مسافاتٍ أصغر. ستكون لنظريتنا القدرةُ الكاملة على التنبّؤ بجميع القياسات التجريبية لغايةِ حدّ أعلى من مقاييس الطاقة أو حدّ أدنى من مقاييس المسافة. علينا عند هذه الحدود أن نتحوّل إلى نظريةٍ جديدةٍ (قد تكون نظرية الأوتار)، وسنحتاج هنا إلى مجهرٍ أكبر بكثير ـ أي إلى مسرِّع جسيمات ذي طاقات أعلى ـ من أجل اختبار التنبّؤات النظرية تجريبياً.



الشكل 29: مخطّطات فاينمان التي تمثّل المرتبة الأولى من التصحيحات الكمومية على نتيجة الشكل 27.

نحو توحيد جميع القوى في الطبيعة

بدأ العصرُ الحديث لنظريات المعيار مع ورقةٍ علمية لافتة للنظر كتبها تشن نينغ يانغ (Chen Ning Yang) وروبرت ميلز (Robert Mills) عام 1954. سأل مؤلِّفا هذه الورقةِ السؤالَ المباشَر التالي: «ماذا يحدث لو استبدلنا بالتناظر المعياري للإلكترون تناظراً آخر؟» إنّ التناظرَ المعياري للإلكترون هو عبارة عن دوران قرص الطور في كاشِف شركة الأوج؛ أي إنه تناظر الدائرة المُسمّى U(1) لا غير. وجّه يانغ وميلز اهتمامَهما على التناظر التالي في متتالية التعقيد التناظري SU(2)، وهو تناظر الكرة في ثلاثة أبعاد حقيقية (أو تناظر الدائرة في بعدَين عقديَّين الذي يكافئ تناظرَ الكرة الطبيعية في ثلاثة أبعاد حقيقية للمكان؛ انظر الملحق). يَثبت في نهاية المطاف أنّ هذا التناظر يقود إلى شكلٍ للإلكتروديناميك أكثرَ عموميةً، ندعوه بنظرية يانغ ـ ميلز. لـ SU(2) ثلاثةُ حقول معياريّة (وبالتالي ثلاثة كائناتٍ شبيهة بالفوتون)، ولكنّ الحقول المعيارية هنا تحمل نفسُها شحناتٍ (بخلاف حالة الإلكتروديناميك حيث لا يحمل الفوتون شحنةً كهربائية). علاوةً على ذلك يصلح بناءُ يانغ ـ ميلز النظريّ على أيّ تناظر، ويغدو التناظرُ إذاً قطعةً وجزءاً من البنية الأساسية للنظرية الكمومية للحقول. لكنْ لم يعرف عالَم الفيزياء حينئذٍ أنّ بابَ توحيد جميع القوى في الطبيعة ضمن نظرية واحدة رئيسة قد فُتِح على مصراعَيه.

نعرف الآن أنّ جميع القوى المعروفة في الطبيعة مبنيةٌ على نظرياتِ تناظرٍ معياريٍّ موضعيٍّ (محلّيّ). يمثّل هذا الأمر خطوةً هامّة نحو توصيفٍ موحَّد لكلِّ شيءٍ في الفيزياء. لاتزال مع ذلك أربع بنى ـ أو **طُرُز** ـ مختلفةٌ من اللاتغيّر المعياري موجودةً في الطبيعة. تحتوي نظريةُ إينشتاين في الثقالة على اللاتغيّر (الصمود) المتعلّق بمنظومة الإحداثيات؛ أي إنه من أجل وصف الطبيعة ليس مهماً ما هي

منظومة الإحداثيات التي نستعملها ولا كيفيةُ اختيارنا لحركتنا ـ سواءٌ أكانت بشكلٍ عطالي أم لا ـ ضمن المكان والزمان. يقودنا ذلك إلى فهم للثقالة على أنها انحناءٌ وإعطاءُ شكلٍ جديدٍ لهندسة الزمكان يتحكّم بهما وجودُ الطاقة والاندفاع والمادة. يجب على الجسيمات عندها أن تُصدِرَ وتمتصّ **غرافيتونات** هي حقولٌ معياريّة ـ أي «كمّات» ـ للثقالة. ويتمّ استردادُ النظرية النيوتنية للثقالة ـ لكن فقط كتقريبٍ ـ عند الطاقات المنخفضة (كأن تكون المنظومات بطيئةَ الحركة، ولا تمتلك مقداراً كبيراً جداً من المادة).

يرتكز وصفُ القوى المتبقّية غير الثقالية في الطبيعة على نظريات يانغ ـ ميلز فعلاً. لقد رأينا كيف يتمّ عملُ الإلكتروديناميك، وكنّا قد قابلنا كذلك القوى الضعيفة سابقاً عند انفجارات النجوم الجبابرة، وسنرى أنها توصَف أيضاً عبر تناظرات معياريّة. تقلبُ هذه التناظرات المعيارية الضعيفة في الواقع هويةَ نوع من الجسيمات (كالإلكترون) لتحوّلها إلى نوعٍ آخر (مثل النترينو). لقد تمّ توحيدُ القوى الضعيفة مع القوى الكهرمغناطيسية، وهذه القوى أيضاً مرتبطة بشكلٍ وثيق مع أصل الكتلة لجميع الجسيمات الأولية الموجودة في الطبيعة.

أمّا القوى الشديدة فبفضلها تتماسك النواةُ الذرّية ضمن الذرّة، وسنرى أنها تتضمّن تفاعلاتِ حقولٍ معياريةٍ لِيانغ ـ ميلز، وذلك بين الجسيمات المسمّاة بالكواركات. وكما يجلب الإلكتروديناميك التابعَ الموجيَّ للإلكترون ويجعله في تماسّ جوهري مع الفوتون، فإنّ القوى الضعيفة والشديدة مَحيكةٌ بشكلٍ دقيقٍ وأساسي ضمن الأنماط والعيّنات التفصيليّة للجسيمات الأولية وخصائصها. في الحقيقة يغدو التمييزُ الفاصلُ بين «الجسيم الأوليّ» و«القوّة» أمراً اصطناعياً ـ نوعاً ما ـ في الفيزياء المعاصرة. ولكن ما هو الجسيم الأوليّ؟ علينا أن نتحوّل باهتمامنا الآن إلى هذا السؤال.

الفصل الثاني عشر
الكواركات واللبتونات

من أمر بذلك؟

إ. إ. رابي (I. I. Rabi) عند إخباره باكتشاف الميون

توصّل الناس خلال القرون العديدة السابقة إلى الاعتقاد والإيمان بوجود **الذرّات** اعتماداً على الإثباتات المُفْحِمة الآتية من علم الكيمياء. تمّ التفكير بالذرّات على أنها «العناصر الأساسية» التي لا تغيّر من خصائصها خلال التفاعلات الكيميائية؛ فالمشتغلون بالكيمياء القديمة (العطّارون) لم ينجحوا أبداً في تحويل عنصر الرصاص (Pb) إلى عنصر الذهب (Au). ما استطاعوه ـ من خلال محاولاتهم اللامتناهية في عددها لتحقيق ذلك ـ كان مجرّد إعادة ترتيبٍ للعناصر ضمن المواد المتنوّعة، فتكدّست لديهم بفعل ذلك قاعدةُ بيانات ضخمة شكّلت الأساسَ لعلم الكيمياء.

نجد المادةَ ـ عند المرحلة الأولى من فحصها بهدف معرفة مكوّناتها ـ مؤلّفَةً من **جزيئات**، وهي تجمّعات كبيرة أو صغيرة من الذرّات. إنّ «العناصرَ الأساسية» في هذه المرحلة مرادفةٌ بشكلٍ رئيسٍ لـ «الذرّات». على سبيل المثال، ملح الطعام هو جزيء يتألّف من ذرّة الصوديوم (عنصر) وذرّة الكلور (عنصر)؛ أمّا جزيء الماء فيتألّف

من ذرّتَي هيدروجين وذرّة أوكسيجين؛ ويحتوي جزيء الميتان على أربع ذرّات هيدروجين مع ذرّة كربون واحدة، وهكذا دواليك. يكون الملحُ والماء والميتان إذاً بشكل جزيئات يمكن تحطيمها كيميائياً من حيث المبدأ ـ بفرض بذل الجهد الكافي في مخبر العطّار ـ إلى ذرّاتها المكوِّنة؛ ولكن هنا تكون الكيمياءُ قد وصلت إلى النهاية. يشكّل الصوديوم والكلور والهيدروجين والأوكسيجين والكربون وغيرها من الذرّات **الجسيماتِ الأساسية** في الكيمياء، وهي غير قابلة للتحطيم والتجزئة أكثر من ذلك إلاّ من خلال إجرائيات تتضمّن طاقاتٍ عالية أكبر بكثير ممّا تستطيع تأمينه مخابر كيميائية.

صُنّفت العناصر في منتصف القرن التاسع عشر تبعاً لخواصّها الكيميائية من قبل دميتري إ. مندلييف (Dmitry I. Mendeleyev)، وقاد ذلك إلى **الجدول الدوري للعناصر** المألوف والمعلّق على جدار قاعة صفّ الكيمياء في أيّ مدرسة ثانوية. تمثّل الأعمدةُ في الجدول العناصرَ ذات الخصائص الكيميائية المتشابهة، ويُعتبر الجدول «دورياً» من حيث إنه يكرّر نفسَه في نمطٍ معيَّن أُعتبر لغزاً بالنسبة إلى علماء القرن التاسع عشر، فاحتجنا إلى أن ننتظرَ ابتكار النظرية الكمومية من أجل إيضاحه وتفسيره. عُدّ الجدول الدوري مع ذلك خلاصةً شاملة مثّلت الذروة بالنسبة إلى مئات السنين من العِطارة والكيمياء القديمة والعلوم، حيث إنه اختزل الجزيئات اللامتناهية واقعياً في عددها إلى حوالي مئة ذرّة أساسية موجودة في الطبيعة (كثيرٌ من العناصر الأثقل لم يتم اصطناعُه إلاّ مؤخّراً، وهذه العناصر لا تحيا إلاّ فترةً قصيرةً جداً، ولذلك لا نجدها عادة مذكورةً في الجداول المعلّقة على جدران قاعات الصفوف في مدارسنا الثانوية القديمة). مثّل الجدول الدوري نمطاً أو عيّنةً من التعقيد في خصائص الذرّات

وشكلها، ودعا لفكرة امتلاكِ الذرّات نفسها بنيةً داخلية ووجوبِ وجودِ طبقاتٍ أعمق من مادةٍ **دون ذرّية**[1].

بدأ الفهمُ التفصيلي للذرّة بعد مندلييف بحوالي خمسين سنة مع اكتشاف طومسون (Thompson) للإلكترون واكتشاف رذرفورد للنواة ثمّ مع نظرية بوهر البدائية عن المدارات الإلكترونية التي اعتمد فيها على ميكانيك الكمّ حديث الولادة حينئذ. إنّ الذرّات مؤلّفَةٌ في الواقع من كائناتٍ أصغر، وهكذا اجتزنا طريقاً امتدّ من مندلييف إلى بوهر (وبالتالي من الجزيئات إلى الذرّات)، لنرى في نهايته كائناتٍ وأشياء داخل الذرّة أكثر أوّليّةً منها، وهي النواة والإلكترونات ومن ثمّ البروتونات والنترونات داخل النواة. بدا الأمر كما لو أنّ متتاليةً من الدمى الروسية[*] كانت موجودةً في الداخل وتمّ فتحها، حيث كانت الأخيرة منها دوماً تبيّن وجودَ دميةٍ روسيّةٍ أخرى بداخلها. أين سننتهي؟ من الممكن أن تكون هذه الأشياء التي وجدناها داخل الذرّة تمثّل آخر الدمى الروسية وأصغرها. لقد تمَّ تجهيز الأدوات اللازمة من أجل تفتيت وتشريح المادة إلى أقسامها الأكثر أساسية، وهذه الأدوات هي النسبية الخاصة وميكانيك الكمّ. وهكذا بدأ عصر علم فيزياء الجسيمات الأولية، وهو أكثر المجالات العلمية عمقاً وأساسيةً.

---

(1) نأسف ـ بسبب ضيق المكان ـ لعدم تمكنّنا من مناقشة الجدول الدوري بالتفصيل. يمكن إيجاد نسخٍ عديدة عنه في الإنترنت، مثل: «A Periodic Table of the Elements at Los Alamos National Laboratory,» www.pear11.lanl.gov.

(وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 14 حزيران/ يونيو 2004). تحتوي الجداول الحديثة على عناصر لا تتوفّر بشكل طبيعي بل تمّ تركيبها حديثاً، وذلك لغاية العدد الذرّي 118.

(*) مجموعةٌ من دمى خشبية مجوَّفة ومطليةٌ، تكون ذات أحجامٍ مختلفة صُمِّمت بحيث يمكن وضعها جميعاً داخل بعضها البعض.

ما داخل الذرّة عند منتصف القرن العشرين

توصّل العلماء في أوائل القرن العشرين إلى إدراكِ أنّ الذرّة مشابهةٌ لمنظومةٍ شمسية (انظر الشكل 30)، ففي المركز يقع ما يشابه الشمس: نواة الذرة. إنّ النواة بدورها كائن مركَّب فهي تحتوي على بروتونات ونترونات. يتمّ تعريف أيّ عنصرٍ ذرّيّ بعددِ البروتونات داخل نواته (وهذا يكافئ شحنةَ النواة الكهربائية)، فعلى سبيل المثال تحتوي نواة الهيدروجين على بروتون وحيد، بينما تحتوي نواة ذرّة الكربون دوماً على ستة بروتونات. بالإضافة إلى البروتونات نجد في النواة جسيماتٍ محايدةً كهربائياً (غير مشحونة) ندعوها بالنترونات، ويمكن لعددها في نواة الذرّة أن يتغيّر من أجل عددِ بروتوناتٍ ثابتٍ. وهكذا تحتوي نواة الكربون ـ 12 على ستة بروتونات وستة نترونات، بينما تحتوي نواة الكربون ـ 13 على ستة بروتونات وسبعة نترونات وهكذا. تُدعى نوى الكربون المختلفة هذه التي تحتوي كلُّها على ستة بروتونات مع أعدادٍ متباينة من النترونات بـ**نظائر** الكربون.

يتحقّق تماسكُ نواة الذرّة بفضل قوةٍ شديدةٍ جداً، تُدعى في الواقع بـ**القوة الشديدة**. لابدّ أن تكون هذه القوة شديدةً وقويةً، لأنّ البروتونات ذات شحنة كهربائية موجبة، وبالتالي يتنافر بعضها مع بعض كهربائياً. لولا وجود هذه القوة فائقة الشدّة التي تعوّض عن التنافر الكهربائي بين البروتونات فتقيّدها وتسبّب تلاحمها بعضها مع بعض ومع النترونات داخل النواة المتراصّة، لتطايرت هذه الأخيرة وتحطّمت إلى أشلاء. وجد العلماء أنّ القوةَ الشديدة ناجمةٌ عن جسيماتٍ أخرى سُمِّيت **البَيونات** (أو ميزونات الـ d)، وهي تثب وتقفز جيئة وذهاباً بين البروتونات والنترونات (حالها في ذلك حال الفوتونات ـ جسيمات الضوء ـ التي تخلق القوة الكهربائية من خلال وثبها وقفزها بين الجسيمات المشحونة كهربائياً في مخطّطِ لِفاينمان).

إنّ نواة الذرّة هي فعلاً كثيفةٌ ومتراصّة بشكلٍ كبير، فمقاسُها نموذجياً هو من رتبة (10^{-15}) متر. وتتركّز كتلة أيّ ذرّة بنسبة 99,95 في المئة داخل النواة.

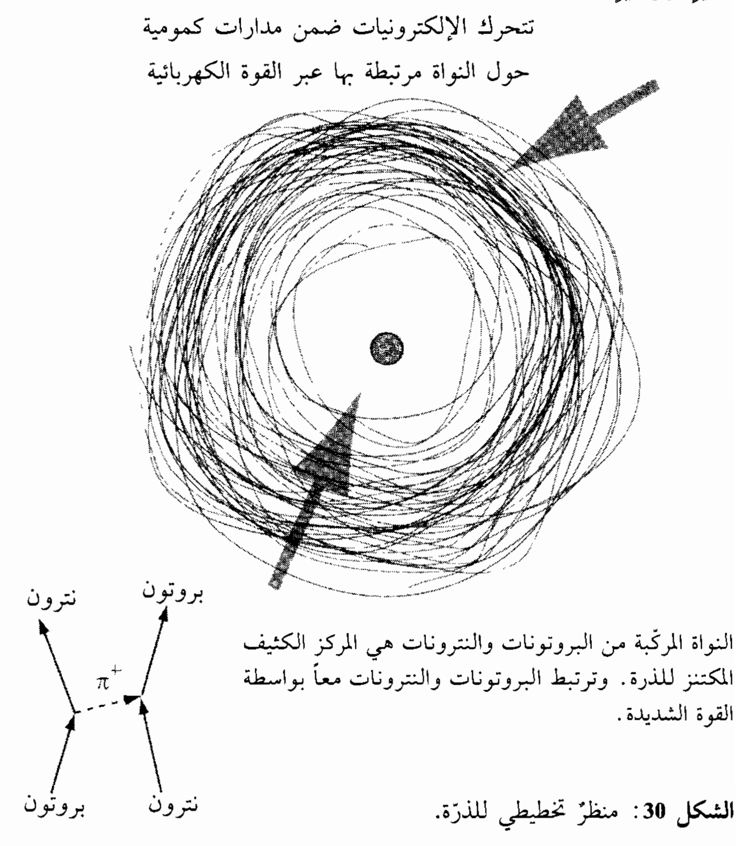
ما يحوم داخل الذرة حول النواة على مسافاتٍ كبيرةٍ نسبياً (بالمقارنة مع مقاس النواة) ـ أي ما يشبه الكواكب التي تدور حول الشمس ـ هو الإلكترونات. يبلغ قياس مدارات الإلكترونات نموذجياً حوالي (10^{-10}) متر، ويتمّ ربط وتقييد الإلكترونات إلى الذرّة من خلال القوى الكهربائية عبر الجذب الكهربائي لشحناتها الكهربائية السالبة نحو شحنات البروتونات الموجبة. عندما تكون الذرّة في حالتها الطبيعية المعتدلة كهربائياً يكون عدد الإلكترونات مساوياً لعدد البروتونات. لا تخضع الإلكترونات إلى القوى الشديدة، وتتحكّم قوانين ميكانيك الكمّ بحركتها فتشكّل مداراتُها تشكيلاتٍ ضبابية.

يقود التشاركُ بحركةٍ مداريةٍ لإلكترونٍ خارجي ـ أي «القفز جيئةً وذهاباً» ـ بين ذرّتَين إلى توليد القوى التي تربط الذرّات بعضها مع بعض لتشكيل الجزيئات. إنّ تفاصيل هذه القوى معقّدَةٌ نوعاً ما، وهناك تنوّعٌ كبير للتشكيلات الذرّية ـ وبالتالي للجزئيات ـ الممكن تحقيقها. يقود هذا التعقيد المتزايد ـ مع عودتنا في رحلتنا لنتّجه صعوداً ونصلَ سلسلةَ الجزيئات ـ إلى الغنى والوفرة في العالَم الذي نعيش فيه، تماماً كحال الانطلاق من صندوقِ دهانات زيتية للوصول إلى تنويعةٍ هائلة من التحف الرائعة والأعمال الفنية المميّزة التي نجدها في متاحف الفنون في العالَم. وهكذا يتمّ تفسير المصفوفة الهائلة لمجموعة الظواهر الكيميائية بدلالة الحركة الكمومية للإلكترونات مع تفاعلاتها الكهرمغناطيسية الناجمة عن التبادل الميكانيكي الكمومي للفوتونات في ما بينها (وهو أمر ناجمٌ عن اعتبارات تناظر المعيار).

في الحقيقة إنّ أولّ الدروس العميقة للقرن العشرين ـ والتي رأيناها في الفصل السابق في أثناء مناقشتنا لمخطّطات فاينمان ـ هو أنّ مفهومَي «القوة» و«الجسيم» يمتزجان معاً ليكوّنا كياناً مشترَكاً موحَّداً. تنجم القوى عن **تبادل الجسيمات** (مثل الفوتونات) بين جسيماتٍ أخرى (مثل الإلكترونات والبروتونات المشحونة كهربائياً) بشكلٍ يضاهي نمط المجيء والذهاب الذي نراه في موسيقى باخ، ويشكّل هذا التبادلُ ببراعة وحذق البنيةَ التحتية لما يظهر لنا كمقطوعة موسيقية رائعة وضخمة ألا وهي الطبيعة.

كخلاصةٍ للوضع القائم آنذاك نقول إنّ جميعَ الجسيمات المكوِّنة لنواة الذرّة والمعروفة ـ عند أوائِل القرن العشرين ولغاية منتصفه ـ وهي البروتونات والنترونات والبَيونات، كان يُظَنّ بأنها جسيمات نقطية وأوّليّة. لقد تمّ التنبّؤ نظرياً بوجود البَيونات من قبل هيديكي ياكاوا (Hideki Yukawa) عام 1935 معتمداً على الخواصّ المعروفة لنواة الذرة، ولاقتضاء النظرية المعاصرة حينئذٍ جسيماً جديداً يمكنه القفز جيئةً وذهاباً بين البروتونات والنترونات ممّا يسمح بتفسير القوى الشديدة. وبشكلٍ مفاجِئ وحتى بالصدفة تمّ اكتشافُ جسيم جديد سمِّي بـ**الميون** عام 1937 خلال الملاحظات والمراقبات الفلكيّة عن الأشعة الكونية، ووُجد أنّ كتلته مساوية تقريباً لقيمة كتلة البَيون المُتنبَّأ عنها نظرياً. سبّب هذا ـ في بادئ الأمر ـ ارتباكاً وتشويشاً، لأنه تمّ الظنّ أولاً أنّ الميون هو البيون، ولكنّ الميون لم يتفاعل بقوة مع البروتونات والنترونات، وبالتالي كان مستحيلاً أن يكون رسولَ ووكيلَ القوة الشديدة الذي تنبّأ به يوكاوا. في الحقيقة بدا كما لو أنّ الميون مجرّد نسخةٍ كربونية عن الإلكترون لا غير، مع كون الميون أثقل بمئتَي مرّة من الإلكترون (وكونه يتحلّل ويتفكّك خلال فترة قصيرة من رتبة الجزء من مليون جزء للثانية). مع ذلك

وبعد مرور وقتٍ ليس بطويل تمّ اكتشافُ البَيونات، ممّا أكّد صحّة نظرية يوكاوا العبقرية، وكان أن حاز بفضلها على جائزة نوبل. لقد بدا كشفُ الميون وكأنه ضربةُ حظّ، وأثار ظهورُه تهكّمَ رابي(*) المشهور: «من أمرَ بذلك؟»، ولكنّ العلمَ حينها كان على أبواب فتحِ دميةٍ روسيةٍ جديدة.



الشكل 30: منظرٌ تخطيطي للذرّة.

(*) عالِم مجري ـ نمساوي ـ أميركي، وُلد عام 1898 وتُوفّي عام 1988. حاز على جائزة نوبل عام 1944 بفضل طرقه الابتكارية لقياس الخصائص المغناطيسية للنوى والذرّات والجزيئات.

يجب أن نذكر أننا هنا على وشك مغادرة عالَم فيزياء الحياة اليومية المألوفة، كي ندخل عالَم الجسيمات الأولية. في هذا العالَم الأخير تصبح قطعُ النقدِ المستعملة عادةً ـ أي واحدات القياس الاعتيادية ـ وخاصة الكيلوغرام غير مناسبة البتّة. من أجل تحديد قيمِ كتل الجسيمات الأولية نستخدم معادلة إينشتاين الشهيرة $E = mc^2$، وبالتالي نستعمل الطاقةَ كمقياسٍ للكتلة. إنّ وحدة الطاقة المناسبة هي **الإلكترون ـ فولط**، وهي تعبّر عن مقدار الطاقة التي تصرفها بطاريةُ فولط واحد عندما تُسيِّر وتمرِّر إلكتروناً واحداً خلال دارة كهربائية. إنّ هذا مقدارٌ ضئيل من الطاقة، لأنّ التيّار الجاري في الدارة الكهربائية يتضمّن عادةً العديدَ من التريليونات من الإلكترونات المارّة فيها. ومع ذلك يزوّدنا الإلكترون ـ فولط بمنظومةِ واحداتٍ ملائمةٍ لتحديد قيم كتل الجسيمات الأولية. ضمن هذا السياق تبلغ كتلة الإلكترون حوالي 0,511 **مليون** إلكترون ـ فولط أو ميف (MeV)، بينما البروتون أثقل بكثير إذ تبلغ كتلته 0,938 **مليار** إلكترون ـ فولط أوجيف GeV (جيغا إلكترون ـ فولط)[2].

الكواركات

في بداية خمسينيات القرن العشرين تمّ إنتاجُ مصفوفةٍ وتنويعةٍ هائلةٍ من جسيماتٍ جديدة وغير متوقَّعة عبر صدم البروتونات مع النوى الذرّية باستعمال التقنية الناشئة حديثاً آنذاك لمسرِّعات الجسيمات ذات الطاقة الكبيرة. نمت بسرعة لائحة اكتشاف

---

(2) يساوي الإلكترون الفولط الواحد ($1,60 \times 10^{-19}$ joules)، وهو مكافئ ـ عبر تقسيمه على مربّع سرعة الضوء $m = E / c^2$، لكتلةٍ قيمتها ($1,78 \times 10^{-36}$ Kg) كيلوغرام. إذا ضربنا كتلة البروتون 0,938 GeV (مليار إلكترون فولط) بـ ($1,78 \times 10^{-36}$ Kg) كيلوغرام نحصل على ($1,67 \times 10^{-27}$Kg) كيلوغرام، وهذه هي قيمة كتلة البروتون مُقدّرةً بالكيلوغرام.

الجسيمات الجديدة وسرعان ما تجاوزَ عددُها عددَ العناصر الذرّيّة، فصار لدينا مستنقعٌ من الجسيمات «الأساسية». كانت جميعُ هذه الجسيمات الجديدة والمتنوّعة أبناءَ عمومةٍ للبروتون والنترون والبَيون - أي لمكوّنات النواة الذرّيّة - تتفاعل من خلال القوة الشديدة في ما بينها. لقد كانت هذه الجسيمات غيرَ مستقرّة وبأعمار حياة قصيرة جداً، وبالتالي لم يكن من الوارد أن تكوِّنَ جزءاً من المادة المألوفة الموجودة على كوكب الأرض. ومع ازدياد وانتشار هذه الجسيمات الجديدة المتفاعلة عبر القوى الشديدة، لم يكن هناك سوى أداة واحدة يمكن الاستعانة بها من أجل محاولة استنباطِ أيّ مغزى من كلّ هذا: إنها التناظر.

لم يكن هناك أيّ فيزيائيٍ في ذلك العصر أقدر على استعمال أداة التناظر من موراي غل - مان[3] (Murray Gell-Mann). حقّق غيل - مان - وهو الطفل المعجزة - أول إسهاماته ذات الشأن في مجال الفيزياء عندما كان في بدايات العشرينيات من عمره. فقد أدرك باكراً أنّ التناظرَ يشكّل أداةً مهمة تقود إلى مخطّطاتِ تصنيفٍ وإلى علاقاتٍ بين الخصائص ثم إلى تنبّؤاتٍ صحيحة عن الخصائص الكمّية للجسيمات. قام غل - مان - مثله في ذلك مثل مندلييف قبل حوالي القرن - بتعريف الأنماط االتي تُعتبَر مفاتيح الحديقة الضخمة للجسيمات الآخذة بالظهور والمتفاعلة من خلال القوة الشديدة، وذلك بواسطة استخدام الرياضيات المعقَّدة لزمر التناظر، وكان بهذا

(3) انظر على سبيل المثال كتاب: Murray Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex* (New York: W. H. Freeman, 1994),

وهذا الكتاب ليس سيرةً ذاتية بل دراسة شاملة تأسر اللبّ عن التعقيد والفيزياء وقضايا أخرى.

يقوم نوعاً ما بتعليم بقية مجتمع الفيزيائيين كيفيةَ التفكير بدلالة اللغة المُلغَّزة للتناظرات الكمومية.

دلَّ التعقيد البارز في التشكيلة وضخامة المجموعة للجسيمات المتفاعلة عبر القوى الشديدة على أنها ليست جسيمات أساسية. وأشارت تناظراتُ هذه الجسيمات ـ مثلها في ذلك مثل الخصائص الكيميائية المتكرّرة للذرّات ـ إلى وجود طبقةٍ أخرى إضافية في أعماقها. ومع ذلك فقد كانت هناك مشاكل جدّيّة بخصوص فكرة وجود هذه الطبقة الأخرى في الطبيعة، إذ لم يكن بالمستطاع تحريرُ ما احتوته الجسيمات المتفاعلة بالقوى الشديدة أو جعلُه ـ بقطع النظر عن طبيعته ـ مستقلاً البتّة. حتى أقوى مسرِّعات الجسيمات التي تنتج أشدّ حوادث الصدم وأكثرها عنفاً لم تستطع على الإطلاق تحريرَ أيٍّ من تلك المكوّنات الداخلية؛ بل بالأحرى أنتجت ببساطة جسيماتٍ غيرَ مستقرّةٍ ومتفاعلة بالقوى الشديدة أكثر فأكثر. رغم ذلك أدخل غل ـ مان من أجل الطبقة التالية المُفترَضة في تشكيل المادة ـ بغضّ النظر عمّا إذا كانت حقيقةً فعليةً أم مجرّد كائناتٍ رياضياتيةٍ لا غير ـ لفظَ **الكواركات** مستعيراً إيّاه من جيمس جويس[*] (James Joyce)[4].

(*) كاتب إيرلندي وُلد عام 1882 وتُوفيّ عام 1941. يُعدّ من أعظم الكتّاب بالإنجليزية في القرن العشرين، ومن أشهر مؤلّفاته (*Ulysses*) (1922) و(*Finnegans Wake*) (1939) المتميّزة بالمهارة اللغوية المعقّدة والمتطلّبة، وقد ورد في هذه الأخيرة لفظ الكوارك.

(4) إنّ غل ـ مان (Gell-Mann) هو من اقترح لفظ **الكواركات** (Quarks) حيث استعاره من مقطعٍ ورد في قصّة (*Finnegan's Wake*) لجيمس جويس (James Joyce): «ثلاثة كواركات لدعوة مارك (Three Quarks for Muster Mark)»، وله الفضل في كسر التقليد القائل إنّ كلّ شيءٍ في فيزياء الجسيمات يحتاج رمزاً من الأحرف اليونانية من أجل التسميات. تمّ بشكلٍ مستقلّ اقتراحُ فكرة الكواركات كذلك من قبل جورج زفيغ (George Zweig) ـ وهو زميل لغيل-مان في كالتيك (Caltech) (معهد كاليفورنيا التكنولوجي) ـ عندما =

وأخيراً في بدايات السبعينيات، تمّ التقاطُ «الصورة بالدقة العالية» للعالَم الداخلي للبروتون في مسرِّع ستانفورد الخطّي (Stanford Linear Accelerator)، ولأول مرّة تمّت رؤيةُ بنى كواركية. وهكذا أمكن فكّ طلاسم الجسيمات المتفاعلة بالقوى الشديدة عبر مفهوم التناظر ومن خلال التجربة، لنكتشفَ دميةً روسيةً أخرى تمثّل المكوّنات الأوّليّة للجسيمات المتفاعلة من خلال القوة الشديدة ألا وهي الكواركات. في الحقيقة الكواركات موجودةٌ في الطبيعة ويمكن قياس خصائصها، لكنها مع ذلك ـ وبشكلٍ لا يزال غامضاً ـ لا يمكن تحريرها من معتقل الجسيمات شديدة التفاعل التي تتكوّن منها.

يمثّل اكتشافُ الكواركات قصة بطولية ورائعة، لكنها أيضاً قصة طويلة، ولذلك لنتقدّم سريعاً كي نصل إلى الوقت الحاضر ونقوم بمسحٍ واستعراضٍ لما نعرفه عن البنى المكوّنة للمادة.

النموذج المعياري للجسيمات والقوى

تُغمَر طالبةُ الدراسات العليا التي بدأت دراستها المتقدّمة في مجال فيزياء الجسيمات الأولية ـ كما في علم الحيوان ـ بالمصفوفة الضخمة والتنويعة الهائلة لأصناف الجسيمات وأنواعها وللتسميات والمصطلحات. بالرغم من وجود عدد وفيرٍ من الكائنات والأجناس في علم الحيوان، فإنّ هناك نظاماً تصنيفياً شاملاً للكائنات، ويعود الفضل في ذلك بشكلٍ أساسيّ إلى وجود أنماطٍ وعيّناتٍ متميّزة في

= كان في زيارةٍ لمختبر السيرن. كتب زفيغ فكرتَه ودوّنها في مطبوعةٍ للسيرن صارت فائقة الشهرة، ولكنها ظلّت غير منشورة. اختار زفيغ تسمية «ذُرَيرات ـ أسّات aces»، وأدرك أنّ بعض الخصائص الديناميكية للجسيمات العديدة المُكتشفة حديثاً يمكن تفسيرها على قاعدة وجود هذه الطبقة التالية في بنية المادة: الكواركات.

الكائنات بزغت وظهرت خلال إجرائية التطوّر. عندما تعرف الباحثةُ الناشئةُ بعلم الحيوان الفرقَ بين شعبة الديدان المُسمّاة مشوّكات الرأس ـ أكانثوسيفاليا (Acanthocephalia) (ديدان طفيلية ذات رؤوس شائكة تشمل حوالي 1150 صنفاً) وبين شعبة الديدان المُسمّاة المَمْسودات ـ نيماتودا (Nematoda) (ديدان مدوّرة تحتوي على ما يقارب الـ 12000 نوع معروف)، فإنها لن تحتاج إلى الدخول في تفاصيل مستنقع خصائص شعبةٍ جزئية من هذه الكائنات، إلاّ إذا اختارت ذلك كحقل اختصاص.

في فيزياء الجسيمات هناك مخطّط تصنيفي أسهل وعددٌ أقلّ من الكائنات، ومع ذلك قد يبدو الأمر مرعباً ومثبِّطاً للهمّة من أول وهلة. تنجم أنماط الجسيمات التي سنذكرها عن قوانين الفيزياء، ولكننا لغاية الآن لا نعرف كيفية حدوث ذلك ولا سببه. يمثّل هذا الأمر لغزاً يشبه حالة جدول مندلييف الدوري للعناصر قبل قدوم النظرية الكمومية. إنّ مملكة الجسيمات الأولّية هي أيضاً دورية، فنحن نرى ضمن أصناف وأنواع الكواركات واللبتونات وبوزونات المعيار عيّناتٍ وأنماطاً وتناظراتٍ ظاهريةً، لكنْ لم يصل بعدُ شخصُ «نيلز بوهر» الجديد كي يفسّر كلّ ذلك بطريقةٍ تنبُّئيّة. وربّما سيحالف النجاحُ طالبةَ الدراسات العليا المبتدئة بدراسة فيزياء الجسيمات من خلال عملها الدؤوب ودراساتها المثابرة وقدرتها الكبيرة على التخيّل.

إنّ الأشياء التي ندعوها اليوم «الجسيمات الأولية» هي ـ ضمن حدود معارفنا الراهنة ـ كُسيراتٌ ماديةٌ نقطيةٌ لا بنية لها؛ ولقد بيّنت جميع المعطيات التجريبية لغاية 2004 أنّ هذه الجسيمات ـ رغم غناها بالخواصّ المتنوّعة ـ لها أبعاد فيزيائية (أي مقاسات) داخلية معدومة! يمكن تخيّل هذه الجسيمات كما لو أنّها منكمشةٌ إلى حجمٍ صفريّ

مخلّفةً وراءها ابتسامةً لا غير (مثل القطة تشاشير (Cheshire) لأليس(*) بالإضافة إلى خصائصها الأخرى مثل التدويم (السبين) والشحنة والكتلة. . . إلخ.

هناك ثلاث «شعبٍ» رئيسية بالنسبة إلى الجسيمات الأولية، تحتوي الشعبتان الأُولَيَان على المكوِّنات البنوية الأساسية للمادة: **الكواركات واللبتونات** (انظر الجدول 1)، بينما تحتوي الشعبة الثالثة على **بوزونات المعيار** أي الجسيمات التي نقول عموماً إنها مسؤولة عن القوى في الطبيعة (انظر الجدول 2). لحسن الحظ فإنّ شعبَ الجسيمات المعروفة بسيطةٌ نوعاً ما، وهي أصغر بكثير من شعب الكائنات الحية على الأرض.

إنّ الجسيمات المدعوّة بـ «جسيمات المادة» هي الكواركات واللبتونات، وكلُّ جسيمٍ من هذه الجسيمات يشبه جيروسكوباً فائقَ الضآلة بتدويم (سبين) مساوٍ لـ 1/2، بما يتّفق مع قواعد ميكانيك الكمّ. تتكوّن مجملُ المادة المألوفة في حياتنا اليومية في العالَم من نوعَين من الكواركات ـ هما **الكوارك العلوي** (up) **والكوارك السفلي** (down) ـ ونوع واحد من اللبتونات هو الإلكترون.

يمكن تمييز هذه الجسيمات الثلاثة من خلال شحناتها الكهربائية وقيم كتلها. نعرّف دوماً شحنةَ الإلكترون الكهربائية بأنها مساوية لـ 1-. ضمن نظام الواحدات هذا، يكون للكوارك العلوي (u) شحنة كهربائية مقدارها 2/3+ ، بينما تبلغ شحنة الكوارك السفلي (d) 1/3-. إنّ البروتون إذاً ليس جسيماً أوّليّاً، ولكنه بالأحرى جسيمٌ مركّب يتألّف من ثلاثة كواركات ضمن العيّنة u+u+d (أو uud). إذا جمعنا

(*) قطة مكشّرة دوماً عن أسنانها في قصة لويس كارول: Lewis Carrol, *Alice's Adventures in Wonderland*, 1865.

الشحنات الكهربائية للكواركات المكوِّنة، نرى أنّ شحنة البروتون تساوي: $+2/3+2/3-1/3 = +1$. وبشكلٍ مشابه يتألّف النترون من الكواركات u+d+d، فتكون شحنته الكهربائية مساويةً لـ: $+2/3-1/3-1/3 = 0$.

كما رأينا سابقاً تستلزم النسبية الخاصة لإينشتاين عند جمعها مع ميكانيك الكمّ أن يكون لكلّ جسيم في الطبيعة جسيمٌ مضادّ له. لقد اختفت من كوننا في الوقت الراهن المادةُ المضادّة التي خُلقت بشكلٍ طبيعيّ لأسبابٍ لا تزال غامضةً وغيرَ مؤكَّدة، ولكننا نستطيع إعادةَ خلقها في المخابر؛ فتبقى للحظاتٍ ضئيلةٍ من الزمن داخل ذاتِ الجسيمات المتفاعلة بالقوى الشديدة. تكون للكواركات المضادّة شحناتٌ كهربائية معاكسةٌ في قيمها لِما عند مقابلاتها الكواركية. نرمز للكوارك العلوي المضادّ بِـ $\bar{u}$ وتبلغ شحنته الكهربائية 2/3-، بينما يُرمز للكوارك السفلي المضادّ بـِ d وله شحنة كهربائية 1/3+ . أمّا البيونات ـ أي الجسيمات التي تجعل البروتونات والنترونات متماسكةً ضمن النواة ـ فهي تتألّف من اجتماعاتٍ لكواركات وكواركات مضادة. نرى بسهولةٍ أنّ هناك أربع إمكانيات لاجتماع كوارك بكوارك مُضادّ تتضمّن u و d و $\bar{u}$ و d هي: $ud\ (-1),\ uu\ (0),\ du\ (+1),\ dd\ (0)$. «تتمازج وتندمج» غالباً في ميكانيك الكمّ التوابعُ الموجية للجسيمات معتدلة الشحنة الكهربائية (أي يضاف بعضها إلى بعض ضمن طرقٍ خاصّة)، فتكون الجسيماتُ المركَّبةُ الناجمةُ التي نلاحظها في المخبر هي: $\pi^- \longleftrightarrow ud$, $\pi^0 \longleftrightarrow uu - dd$, $\pi^+ \longleftrightarrow du$ و $\eta^0 \longleftrightarrow uu + dd$. تمثّل التركيباتُ الثلاثة الأولى البَيوناتِ، أمّا التركيب الرابع فيُدعى بـ: «ميزون ـ إيتا Eta-Meson». إنّ خصائصَ جميعِ هذه الجسيمات الأربعة معروفةٌ جيداً من خلال التجربة، ويسمح التركيبُ الكواركي الذي لها بتفسيرٍ مرتّبٍ وأنيقٍ لخصائص هذا النمط والعيّنة من الجسيمات. في الحقيقة يمكننا من خلال معرفة كتل البَيونات

والميزونات الأخرى استنتاجُ كتل الكواركات نفسها، كما هو مذكور في الجدول 1.

اللبتونات			**الكواركات**					
الشحنة	الكتلة		أصفر	أزرق	أحمر	الكتلة		الشحنة
الجيل (العائلة) الأولى								
0		نترينو الإلكترون	u (yellow)	u (blue)	u (red)	0.005 GeV	علوي	+2/3
-1	0.0005 GeV	الإلكترون	d (yellow)	d (blue)	d (red)	0.01 GeV	سفلي	-1/3
الجيل (العائلة) الثانية								
0		نترينو الميون	c (yellow)	c (blue)	c (red)	1.5 GeV	فاتن	+2/3
-1	0.10 GeV	الميون	s (yellow)	s (blue)	s (red)	0.15 GeV	غريب	-1/3
الجيل (العائلة) الثالثة								
0		نترينو التاو	t (yellow)	t (blue)	t (red)	178 GeV	ذروي	+2/3
-1	1.5 GeV	التاو	b (yellow)	b (blue)	b (red)	5 GeV	جميل أو قعري	-1/3

الجدول 1: الجدول الدوري للكواركات واللبتونات. إضافةً إلى ما هو مذكور في الجدول هناك أيضاً الجسيمات المضادّة كما تقتضي النسبية الخاصة. تمتلك الجسيمات المضادّة قيماً معاكسة للشحنة الكهربائية وألواناً مضادّة، وبالتالي يكون للكوارك الأزرق كواركٌ مضادّ «ضدّ أزرق»، كما لو كان اجتماعاً للّونَين الأصفر والأحمر. للنترينوات كتلٌ صغيرة جداً نتوقّع لها أن تكون أصغر من رتبة 1 إلكترون ـ فولط. تمثّل كتلُ النترينوات والآثار المترتّبة عليها (المُسمّاة **اهتزازات**) اكتشافاتٍ حديثةً، وهي في الوقت الحاضر حقلُ بحوثٍ نشيطٌ جداً في مجال فيزياء الجسيمات الأولية.

بوزونات المعيار				
الكتلة		الكتلة		الشحنة
القوى الشديدة (الغليتونات)		**القوى الكهرضعيفة**		
0 GeV	(أحمر، ضدّ أزرق)	0 GeV	الفوتون	0
0 GeV	(أحمر، ضدّ أصفر)	80.4 GeV	W^+	+1
0 GeV	(أزرق، ضدّ أحمر)	80.4 GeV	W^-	-1
0 GeV	(أزرق، ضدّ أصفر)	90.1 GeV	Z^0	0
0 GeV	(أصفر، ضدّ أحمر)			
0 GeV	(أصفر، ضدّ أزرق)	**قوى الثقالة**		
0 GeV	(أحمر، ضدّ أحمر) ـ (أزرق، ضدّ أزرق)	0 GeV	الغرافيتون	0
0 GeV	(أحمر، ضدّ أحمر) + (أزرق، ضدّ أزرق) ـ 2 (أصفر، ضدّ أصفر)			

الجدول 2: جدول بوزونات المعيار. تُدعى هذه البوزونات كذلك بـ «حوامل القوى»، وتتعرّف جميعها من خلال تناظرات المعيار.

تحتوي الذرّات كذلك على الإلكترونات، وهي فعلاً جسيمات أساسية من صنف اللبتونات. لنذكر هنا أنّ مقالاتِ الصحف حول فيزياء الجسيمات الأولية غالباً ما تصرّح بأنّ المادة تتألّف كلّها من كواركات. وهذا ليس صحيحاً، والسبب في ذلك هو أنّ اللبتونات ليست جسيمات مركّبة من كواركات أو من أيّ شيءٍ آخر نراه، بل هي بحدّ ذاتها جسيمات أوّليّة. أمّا الكواركات فهي تتوضع في أعماق

المادة مكوِّنةً البروتونات والنترونات والبَيونات داخلَ نواة الذرّة. وهكذا من وجهة نظر الكيمياء يشبه دور النوى ببساطة دورَ الحصى الثقيلة التي نفرش بها الطريق، أمّا الإلكترونات فهي التي تؤدي ـ من خلال رقصها عندما تثب وتقفز بين الذرّات ـ إلى التنوّع الهائل في العالَم البيولوجي والكيميائي.

رأينا كذلك أنّ انفجار السوبرنوفا لنجم جبّار ينجم عن عملية التفاعل: $p^+ + e^- \rightarrow n^0 + \nu_e$ المتضمّن أيضاً لجسيم لبتوني هو نترينو الإلكترون ν_e. في الواقع تحدث مثل هذه العمليّات الآن في الأعماق الداخلية لقلب الشمس بالذات (ولكن لا داعي للجزع، فشمسنا لن تلاقي مصيراً مماثلاً لانفجار السوبرنوفا). تتدفّق ملياراتٌ من نترينوات الإلكترون إلى خارج الشمس، فتخترق أجسامَنا في كلّ ثانية. تساوي الشحنة الكهربائية لنترينو الإلكترون الصفرَ، أمّا كتلته فهي فائقة الصغر ويمكن إهمالها تقريباً. لا تخضع النترينوات لا للتفاعلات الكهربائية ولا للتفاعلات الشديدة (لأنها لبتونات)؛ وبالتالي تتفاعل بشكلٍ ضعيفٍ جداً مع بقية المادة.

يشكّل الكواركان u وd مع اللبتونَين e وν_e «عائلةً» ندعوها بـ «**الجيل الأول**» أو «**الذرّية الأولى**»، وهي تضمّ الكواركات واللبتونات (المشحونة) ذات الكتل الأخفّ. تشكّل ذرّيّات (أجيال) الكواركات واللبتونات نمطاً معيّناً نبيّنه في الجدول 1. علينا التنبيه حالاً إلى أننا لا نملك تفسيراً عميقاً لما نعنيه فعلاً بـ «الذرّيّة (الجيل) الأولى» بالرغم من وجود نظريات كثيرة حول ذلك. إنّ النمطَ العائلي هذا هو تمثيلٌ مريحٌ، ولكنه لم يحصل بعدُ على الإقرار العلمي المُتفَق عليه. وفي نهاية الأمر لابدّ من الإقرار بأننا هنا نقترب من حدود معرفتنا حول العالَم، وكحال ساحة المعركة تغدو الأمور تجريبية ومؤقّتة، وهكذا يمكن للأسس والقواعد أن تفلتَ من متناول إدراكنا وفهمنا في أيّ لحظة.

إذاً ما الذي يقرّر ويحكم بنيةَ ذرّيّةٍ (جيلٍ) ما؟ أولاً، هذه الجسيمات الأربعة هي الأخفّ بين أنواعها، ولذلك نجمعها معاً اعتماداً على معيار الكتلة آملين أن يأتي تناظرٌ ما في أحد الأيام ليفسّر هذا الاجتماعَ بتفصيلٍ أكبر. علاوة على ذلك، نلاحظ أنه إذا ما شملنا وعددنا جميعَ الجسيمات ضمن عائلةٍ واحدة ـ آخذين في الاعتبار أيضاً ألوانَ الكواركات ـ لكانت الشحنة الكهربائية الكليّة للعائلة مساويةً للصفر. يعني ذلك أنّ مجموع شحنات ثلاثة كواركات علوية وشحنات ثلاثة كواركات سفلية مع شحنة الإلكترون وشحنة النترينو هو الصفر ($(3\times 2/3) + (3\times -1/3) - 1 = 0$)!. هذا دليلٌ إضافي على وجودِ نمطٍ أو عيّنة، ويدعونا إلى اقتراح فكرةِ وجودِ تناظراتٍ أعمق. مع ذلك لا نعرف لغاية الوقت الحاضر أصلَ هذه العيّنة بالضبط[5].

في جميع الأحوال، لو كان أمرُ تصميم الكون بيدنا لأمكننا التوقّف هنا، إذ يبدو أنّ مجملَ المادة والعمليات في الطبيعة ذات

---

(5) لدينا في الحقيقة نوع من الفهم لواقع أنّ مجموع الشحنات الكهربائية لجميع اللبتونات والكواركات في ذرّيّة (عائلة) معطاة يجب أن يكون مساوياً للصفر. ينجم هذا عن ضرورة تحقيق حذفٍ كامل لشذوذات أدلر ـ باردين ـ بيل ـ جاكيو (Adler-Bardeen-Bell-Jackiw) التي تمثّل خطراً كمومياً يهدّد وجود التناظر المعياري في التفاعلات الضعيفة. يحصل «حذف الشذوذات» هذا بأسهل طريقة عندما يكون لدينا الشكل النمطي الخاصّ للكواركات واللبتونات الذي نراه في كلّ ذرّيّة [يعني ذلك أنّ اتّساقَ النظرية الكمومية للنموذج المعياري يستلزم «حذف الشذوذات»، وهذا بدوره لا يمكن تحقيقه ما لم تكن الشحنة الكهربائية الكلية في العائلة الواحدة معدومةً]. لدينا كذلك «نظريات توحيدية» جميلة ومُقنِعة ـ مثل نظرية SU(5) لغلاشو (Glashow) وجورجاي ـ (Georgi) «تتنبّأ» بوجود هذا النمط الخاصّ للجسيمات ضمن العائلة الواحدة. مع هذا لا تسمح لنا أيّ من النظريات الحالية بأن نكون متأكّدين تماماً من أنّ لبتوناً معيّناً ـ الإلكترون مثلاً ـ سيأتي بالضرورة مع كوارك علوي وآخر سفلي، وليس مع الكوارك الذروي أو القعري (الجميل)، أو مع ترتيب ومزج آخَرين للأشياء.

الصلة بحياتنا اليومية تتضمّن هذه الكائنات الأربعة للذرّيّة (الجيل) الأولى لا غير، وأنه لا حاجةَ عملياً ولا ضرورةَ إلى أيّ شيءٍ آخر ـ ولا حتى أيّ فائدة تُجنى منه ـ في الطبيعة. لذلك نحن لا نفهم عقلَ الطبيعة من حيث إنها تزوّدنا وبشكلٍ محيّر بذرّيّتَين (جيلَين) إضافيّتَين من الكواركات واللبتونات ضمن النمط نفسه تماماً للذرّيّة (الجيل) الأولى وبالخصائص نفسها بالضبط ولكن بكتلٍ أكبر[6].

تحتوي الذرّيّة (الجيل) الثانية ـ انظر الجدول 1 ـ على **الكوارك الفاتِن** c (Charm) و**الكوارك الغريب** s (Strange) بالإضافة إلى اِلبتونَين هما **الميون** m و**نترينو الميون** n_m. لقد بدت هذه الجسيمات ـ حتى عند مطلعِ اكتشافها ـ كإضافاتٍ وملحقاتٍ لقائمة المكوّنات في العالَم الفيزيائي (يتبادر مرة أخرى إلى ذهننا التهكّمُ الشهير للعالِم رابي وسخريته عندما قال: «من أمر باكتشافهم؟»). وإذا بدت الذرّيّة (الجيل) الثانية عديمةَ الفائدة، فإنّ الذرّيّة (الجيل) الثالثة تبدو لا حاجة إليها البتة محتويةً على **الكوارك الذروي** t (Top) و**الكوارك الجميل** أو **القعري** b (Beauty أو Bottom) بالإضافة لِلّبتونَين **التاو** t و**نترينو التاو** n_t. نرى إذاً ثلاث ذرّيّات (أجيال) كاملة في الطبيعة من الكواركات واللبتونات، وكلّ ذرّيّة تالية هي نسخةٌ من الذرّيّة السابقة إلاّ أنها أكثر ثقلاً. ما هو سبب وجود هذه العيّنة من الجسيمات في

---

(6) مع ذلك وقبل أن نسمح لأنفسنا بالانجرار بعيداً كخبراء في فعاليّة الجسيمات وفي تقنين وتقليص نفقات عِلْمها محاولين تشذيب ذرّيّات الطبيعة، يجب أن نلاحظ أنّ انتهاك الـ CP الذي نراه في الطبيعة **يقتضي** ـ لأسبابٍ تقنية ـ **وجود** جميع الذرّيّات الثلاث، وقد سبق لنا أن رأينا ضرورة وجود نوعٍ من انتهاك الـ CP لكي توجدَ المادةُ في الكون ولو بمقدارٍ ضئيل. علاوةً على ذلك كانت جميعُ الكواركات واللبتونات فعّالة في الكون الموغل في القدم، وقد أدت دوراً مهماً في تشكيل الكون الذي نراه الآن. سنكون إذاً مُهمِلين ـ لا نتمتّع بحسّ المسؤولية ـ لو غضضنا النظر عن هذه الجسيمات وأسقطناها من حساباتنا.

كلّ ذرّيّة؟ وهل هذه الذرّيّات الثلاث هي الموجودة فقط أم أنّ هناك ذرّيّاتٍ أخرى؟ ما الذي يقرّر نمطَ وعيّنة قيم الكتل داخل كلّ ذرّيّة؟ هذه كلّها أسئلةٌ مفتوحة، وتحتاج إلى معطيات تجريبية إضافية حيث إنّ المنظرين لا يساعدوننا كثيراً هنا من أجل الإجابة عنها.

ومع ذلك هناك إشاراتٌ ودلائل على أنّ الكوارك الذروي يقع فعلاً في الذروة وأنه يمثّل نهايةَ المتتالية، فلدينا الآن إشاراتٌ تجريبية غير مباشرة ناجمةٌ عن دراساتٍ تفصيلية لـ **التفاعلات الضعيفة** بأنه ليس هناك من ذرّيّات (أجيال) أخرى من الكواركات واللبتونات (على الأقلّ ليس ضمن النمط والعيّنة اللذين يوجدان لدينا في الوقت الراهن[7]. علاوةً على ذلك فإنّ كتلة الكوارك الذروي هي فعلاً ضخمة بالمقارنة مع مقاييس كتل الكواركات الأخرى واللبتونات، وهناك دلائل غير مباشرة على أنّ المكان لا يتّسع لكواركٍ ثقيلٍ آخر. في الحقيقة يقترح الوضع الحالي ـ وبشكلٍ مغرٍ ومعذِّب معاً ـ أنّنا ربّما نكون على أبواب الإجابة عن واحدٍ من أهم الأسئلة في الطبيعة: مِن أين تأتي كتلُ الجسيمات الأولية أو ما الذي تنجم عنه؟ يمكن للكوارك الذروي أن يمارس دوراً خاصّاً أساسياً هنا، أو على الأقلّ يمارس دورَ مشاهِدٍ جالسٍ في الصفّ الأول من منصة الشرف. ومن أجل تقدير قيمة هذه القضيّة علينا أن نتوجّه باهتمامنا الآن إلى القوى في الطبيعة.

---

(7) في واقع الأمر إنّ النمط الذي هو بشكل عائلات (أو أجيال) يتضمَّن الحلزونيّات (اللولبيّات) ـ وبشكل أصّح **اللاانطباقيات** [يُعرَّف مؤثر «اللاانطباقية» من خلال مصفوفة خاصّة تُدعى مصفوفة غامّا الخامسة، بينما يُعرَّف مؤثّر «الحلزونية (اللولبية)» من خلال التدويم (السبين) والاندفاع. يتطابق هذان المفهومان عندما تكون الكتلة معدومة، ويمكن اعتبارهما تقريبَين جيّدَين لبعضهما البعض عندما تكون الكتلة صغيرة للكواركات واللبتونات. ويعني هذا أنّ الجسيمات «يساريّة اليد» هي فقط ما يتأثّر بالقوى الضعيفة في أيّ ذرّيّة (عائلة). ورغم أنه من الممكن أن نستمر بإكمال ذلك النمط أو العيّنة، لكنّ هذا سيجعلنا نحتاج عندها لجسيماتٍ من النوعَين «يساريّ اليد» و«يمينيّ اليد» يتأثّر كلاهما بالقوى الضعيفة.

في الواقع لابدّ من وجود شيءٍ يسبّب تماسكَ الكواركات والكواركات المضادّة داخل الجسيمات المتفاعلة عبر القوى الشديدة أي البروتون والنترون والبَيونات وبقية القائمة الطويلة من الكائنات ذات الصلة والتي اكتُشِفَت خلال الخمسينيات والستّينيات من القرن العشرين. ترتبطُ جميعُ هذه الجسيمات بواسطة **القوة الشديدة** التي تتفاعل من خلالها هذه الجسيماتُ المركَّبة مثل البروتونات والنترونات والبَيونات. ولكنْ يجب أن تكون هذه القوةُ الشديدة هي القوة التي تعمل عند الطبقة التالية الأكثر أساسيةً، فتؤثّر على الكواركات نفسها. إنّ كونَ الكواركات تتفاعل من خلال القوة الشديدة يقود بدوره إلى تعقيدٍ كبير في حدّ ذاته[8].

لا نرى في الطبيعة إلاّ تركيباتٍ معيّنة من مكوَّنات الكواركات، فلا نجد إلاّ تلك الكائناتِ المحتوية على ثلاثة كواركات والمُسمّاة **الباريونات** (أو ثلاثة كواركات مضادّة، فتُدعى الباريونات المُضادّة)، أو كائناتٍ تحتوي على كوارك وكوارك مضادّ تُسمّى **الميزونات.** مهما كانت طبيعة القوة الشديدة على المستوى الكواركي، فإنّ عليها تفسيرَ وجود هذه العيّنة أو هذا النمط الخاصّ. وهنا يبرز السؤالُ عن طبيعة القوة الشديدة التي تسبّب تماسكَ الكواركات داخل الهادرونات؟ في

(8) نشير إلى مجمل الحشد الوافر من الجسيمات المرّكَبة التي يمكن بناؤها ابتداءً من الكواركات (وأضدادها) باسم **الهادرونات.** تُدعى الهادرونات التي تتألّف من ثلاثة كواركات (أو ثلاثة كواركات مضادّة) بـ**الباريونات**، بينما تُدعى الهادرونات المكوَّنة من تجميعاتٍ لكوارك ـ كوارك مضاد بـ**الميزونات.** هناك «حالاتٌ مُثارة» موافقة لهذه الجسيمات المحتوية على الكواركات ندعوها بـ**الرنينات**، وهي تسلك سلوكَ منظومةٍ بمستويات طاقية كمومية مختلفة ـ مثلها في ذلك مثل الإلكترون المُحتجَز في بئر كمومي ـ وبالتالي تُبدي «أنماط وتر القيثارة» التي ذكرناها في الفصل العاشر. جميع الباريونات لها تدويمات (سبينات) بقيم نصف صحيحة: 2/1، 2/3، 2/ . . . 5 إلخ؛ بينما تمتلك جميع الميزونات تدويمات (سبينات) صحيحة: 0، 1، 2 . . . إلخ.

الحقيقة ـ وكما ذكرنا سابقاً ـ كانت هناك محاولاتٌ لا تُحصى من أجل تحرير الكواركات تجريبياً، ولكنها باءت جميعاً بالفشل إذ وجدنا دوماً أنّ الكواركات بقيت محتجَزةً داخل الهادرونات التي تحتويها. تتحوّل القضيّة إلى خاصيّة أساسية وحذقة للكواركات، تبيّن بدورها وجودَ تناظرٍ جديدٍ في الطبيعة.

نجد عندما نتفحّص الكواركات في الجدول 1 بتفصيلٍ أكبر أنّ كلاًّ منها يأتي ضمن «ثلاثية»، ونعني بذلك أنّ هناك ثلاثة أنواع للكوارك العلوي وثلاثة أنواع للكوارك السفلي وهكذا. ندعو هذا الوسمَ الإضافي (اللصاقة الجديدة) بـ**اللون الكواركي**. ولهذا نقول إنه يوجد «كوارك علوي أحمر» و«كوارك علوي أزرق» و«كوارك علوي أصفر». لا مناص من التأكيد هنا على أنه لا علاقة لهذا اللون الكواركي بالألوان المرئية في قوس قزح، ولكنه وصفٌ خياليٌّ لتناظر الكواركات الإجمالي يمكن أن يساعد الذاكرة.

من الصعب فيزيائياً الكشف عن لون الكوارك، لأنّ قيمةَ اللون الصافي لأيّ جسيم ملاحَظ تُكوِّنه الكواركات ـ أي لأيّ هادرون تعريفاً ـ هي دوماً **الصِّفر**. على سبيل المثال، يحتوي البروتون في أيّ لحظة على uud، ولكنّ أحد الكواركات الثلاثة يكون أحمرَ والثاني أزرق والأخير أصفر، فيكون الناتجُ حالةً عديمة اللون.

يجب النظر إلى الكواركات المُضادّة على أنّ لها ألواناً مُضادّة، وذلك ضمن معنى «دولاب» الألوان. وهكذا يكون لون الكوارك العلوي ضدّ الأزرق في الحقيقة أصفرَ وأحمر أي هو كائن «برتقالي». ومن هنا يمكننا خلق ميزونات متوازنة لونياً من خلال دمج أزواجٍ من الكواركات والكواركات المُضادّة. تفسّر لنا هذه القاعدة البَسيطة أشكالَ الجسيمات المقيَّدة التي نراها؛ وتعطينا فوق ذلك دليلاً ومفتاحاً لحلّ لغز النظرية الأساسية للتفاعلات والتفاعلات بالقوة الشديدة.

القوى الشديدة هي تناظر معياري

كيف لنا أن نعرف بوجود لونٍ للكوارك مادمنا لا نراه؟ في الحقيقة تمّ استباقُ معرفة وجود اللون خلال الأيام الباكرة لنظرية الكواركات بسبب التناظر التبادلي للجسيمات المتطابقة. هناك جسيمٌ مركَّب ـ يتآثر عبر القوى الشديدة ـ تنبّأ غل ـ مان بطريقة درامية ودقيقة بخصائصه عام 1963، وسُرعان ما أكّد التجريبيّون هذا التنبّؤ في مخبر بروكهافن الوطني(*) (Brookhaven National Laboratory). يُدعى هذا الجسيم بـِ: «أوميغا ـ ناقص» Ω^-، وهو يحتوي على ثلاثة كواركات غريبة أي sss. كان من المعروف كذلك أنّ الكواركات المكوِّنة لـ Ω^- يجب أن تتحرّك ضمن مدارٍ واحد مشترك، ولكنّ هذا الأمر في غياب اللون الكواركي **ممنوعٌ تماماً** بسبب التناظر التبادلي؛ إذ كان سيمثّل وقتَها ثلاثةَ فرميونات متطابقة موجودة في نفس الحالة الكمومية (انظر الفصل 10). وبالرغم من ذلك تبيَّن أنّ الـ Ω^- موجودٌ، وكانت الطريقة الوحيدة للخروج من هذا المأزق هي وجود اللون الكواركي. إذ لو كان أحد الكواركات الغريبة sss المكوِّنة لـ Ω^- «أحمرَ» والثاني «أزرق» والثالث «أصفر»، فإنّ هذه الكواركات لا تكون حينئذٍ متطابقة، ولا يعود هناك وجودٌ لمشكلةٍ في احتلال جميع هذه الكواركات الثلاثة لنفس الحالة الكمومية في الوقت نفسه. هناك طرقٌ كثيرة تمّ فيها «عدّ وإحصاء» عدد ألوان الكواركات في التجربة، وكانت النتيجة دوماً متوافقةً مع العدد ثلاثة.

يقودنا هذا الأمر إلى السؤال عن الطبيعة الحقيقية لتناظر اللون الكواركي. يمكننا أن نفكّر بالكواركات كما لو كانت تعيش في فضاء

(*) مخبر أبحاث مشهور في منطقة أبتون (Upton) في نيويورك، تأسّس عام 1947.

ثلاثي الأبعاد حيث وُسِمَت محاوره الثلاثة بالألوان الثلاثة. في هذا الفضاء يمكننا تخيّل الكوارك على أنه سهمٌ (أو شعاعٌ) يستطيع أن يشير إلى أيّ اتّجاه، فإذا كان الكواركُ أحمرَ أشار سهمُه باتجاهٍ موازٍ لمحور اللون الأحمر؛ بينما لو كان أزرقَ لأشار سهمه باتجاه محور اللون الأزرق؛ وهكذا أيضاً بالنسبة إلى اللّون الثالث، هذا مع التأكيد على أنّ السهمَ يمكنه أن يدور ليشير إلى أيّ اتّجاه. إنّ التناظر اللوني ليس إلاّ مجموعةَ الدورانات التي يمكننا إجراؤها على سهمِ كواركي (وهو ما تُعبِّر عنه زمرة التناظر SU(3)، انظر الملحق).

الآن لنفرض ونعمّم فكرةً وردت في الفصل السابق ألا وهي فكرة اللاتغيّر (الصمود) المعياري. يعني اللاتغيّرُ المعياري أننا نستطيع تغييرَ «الطورِ» غيرِ القابل للملاحظة للتابع الموجي لكواركٍ ما (الاتجاه الذي يشير إليه جهازُ كاشِف التابع الموجي لشركة الأوج)، تماماً كما فعلنا مع الإلكترون حيث سبّب هذا التغيير حينها اختلاطاً وتلاعباً بطاقة الإلكترون واندفاعه. كان الثمنُ الذي دفعناه ـ في حالة الإلكترون ـ من أجل هذا التناظر هو إدخال الفوتون، وذلك كي نمحو ونلغي أثر التلاعب الذي أجريناه وكي نعيد اندفاع الإلكترون وطاقته إلى قيمتَيهما الأصليّتَين (عن طريق تدوير القرص بشكل معاكس في جهاز كاشف شركة الأوج). وهكذا غدا الإلكترون مزيجاً وتوليفةً من تابعه الموجي نفسه مع حقل المعيار، وعبر هزِّنا للإلكترون ـ أي من خلال جعله يتسارع ـ أمكننا أن نتسبّب بإصدار جسيمٍ فيزيائيٍّ لحقل معيار ـ أو **بوزون معياري** ـ هو الفوتون.

بالطريقة المذكورة أعلاه لنعمّم مفهومَ التناظر المعياري في حالة الكواركات. لنفترض أننا سمحنا للتغيير الذي نجريه (تحويل معياري) على التابع الموجي للكوارك أن يكون في الوقت نفسه **دوراناً** في فضاء الألوان وتغييراً لـ**طاقة** الكوارك **واندفاعه**. إذاً نستطيع على سبيل

المثال إجراءَ تحويلٍ يُدير الكواركَ السفلي الأحمر تماماً إلى كوارك سفليّ أزرق، بالإضافة إلى خلطنا وتلاعبنا بقيم الاندفاع والطاقة للكوارك. نريد من هذه العملية أن تمثّل تناظراً، لذلك نرغب بأن ننتهيَ في حالةٍ تبقى موافقةً لِلَونٍ أحمرَ صرفٍ، بالإضافة طبعاً إلى نفس قيم الاندفاع والطاقة التي ابتدأنا منها. وكما رأينا في الحالة السابقة للإلكترون، يستلزم هذا الهدفُ إدخالَ جسيمات جديدة «تحذف وتلغي» التغييرات التي أجريناها على اللون الأحمر مع إعادتها قيمتَي الاندفاع والطاقة إلى سابقتَيهما، بحيث تكون النتيجة الإجمالية لامتغيّرةً.

نحتاج إلى الحصول على مثل هذا التناظر المعياري اللوني إلى ثمانية جسيمات معيار جديدة تُدعى بـ **الغليّونات**. تصدر الغليّونات من الكواركات مثلها في ذلك مثل الفوتونات، ولكنها تحمل اللونَ القديمَ للكوارك بالإضافة إلى لونٍ إضافيّ جديد، أي إنّ للغليّون لوناً عادياً ولوناً مضاداً عندما نقوم بإجراء دورانِ معيارٍ موضعي مبتدئين بكواركٍ أحمر ثمّ مغيّرين إياه إلى كواركٍ أزرق (كما في مثالنا)، فإننا نقوم في الوقت نفسه بخلق غليّون (أحمر، ضدّ أزرق)، بحيث يصبح اللون الإجمالي الصافي هو: أحمر + ضدّ أزرق + أزرق = أحمر، وبالتالي تتمّ استعادة اللون الابتدائي ـ الأحمر ـ للكوارك. يعوّض الغليّون أيضاً عن التلاعب في المعلومات الخاصة بالطاقة والاندفاع، بحيث يكون للحالة الكمومية الكواركية النهائية نفس قيمتَي الاندفاع والطاقة اللتين ابتدأنا بهما (انظر الشكل 31). وهكذا صار لدينا إذاً تناظرٌ معياري جديد وقوةٌ جديدة في الطبيعة مرتبطان باللون الكواركي[9]! إنّ الدلائلَ والبراهين التجريبية المحبِّذة لوجود

(9) عدد الغليّونات هو (1 ـ 9 = 8). يبلغ عدد أزواج (لون، ضدّ لون) التي يمكن الحصول عليها منطقياً التسعة، ولكنّ هناك تركيباً معيّناً هو $g\bar{g} + b\bar{b} + r\bar{r}$ لا يُعدّ عنصراً =

الغليّونات ـ والمتراكمة منذ ثمانينيات القرن العشرين ـ مبنيةٌ على أساس متين.

إذا تسارع الكوارك فهذا يؤدي إلى إصدار غليّون فيزيائي ذي مواصفات معيّنة، ويجب ملاحظة أنّ إصدارَ غليّون (أحمر، ضدّ أزرق) يمكن حدوثُه انطلاقاً من كوارك أحمر يتمّ تحويله إلى كوارك أزرق. بالمقابل إذا اصطدم غليّون مع كوارك فإنّ هذا الأخيرَ يمتصّه فيتسارع. ربّما يكون من أهمّ مظاهر العلم الحديث الأمرُ الذي يتضمّن أنّ الفكرةَ البسيطة لوجود تناظرٍ يعبّر عن لاتغيّر (صمود) المعيار الموضعي ـ وهي الفكرة التي تقتضي وجودَ الفوتون ويُبنى عليها الإلكتروديناميك الكمومي ـ هي نفسها التي تَنجمُ عنها النظريةُ الصحيحةُ للتفاعلات الخاصة بالقوة الشديدة عندما تُطبَّق على اللون الكواركي. تُدعى هذه النظرية باسم **ديناميكا التلوين الكمومية** أو **الكروموديناميك الكمومي** (أو اختصاراً كيو سي دي QCD)، وقد لاقت هي أيضاً نجاحاً باهراً مثل الإلكتروديناميك الكمومي.

تتفاعل الكواركات بعضها مع بعض إذاً من خلال تبادل الغليّونات في ما بينها (انظر الشكل 32). نستطيع أن نرسمَ مخطّطات فاينمان الموافقة، وأن نتعلّم كيفية حسابها. إنّ هذه القوةَ شديدةٌ لأنّ «الشحنةَ اللونية» ـ وهي الأمر المقابل للشحنة الكهربائية هنا ـ قيمتُها كبيرة.

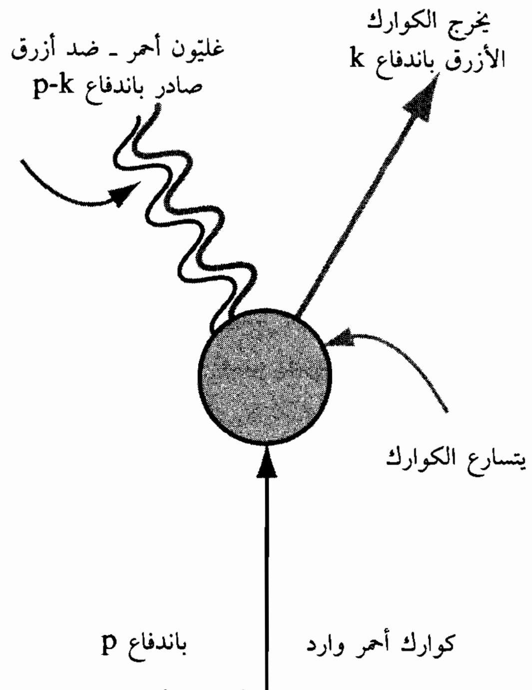
يتمثّل أحدُ أهمّ الاكتشافات في نظرية الـ QCD في أنّ شدةَ الاقتران (الربط) لتفاعل الكواركات والغليّونات ـ الذي نرمز له بـ g_3 (وهو المقابل كما ذكرنا للشحنة الكهربائية e) ـ يصبح في الحقيقة أوهن وأضعف عندما تتقارب الكواركات لتصبح على مسافاتٍ فائقة

= في زمرة التناظر SU(3)، أي إنه لا يسبّب تدويرَ أيّ شيءٍ في فضاء الألوان، وبالتالي لا يتجلّى لنا كغليّون. وهكذا يتبقّى لدينا عددٌ إجماليٌّ يتألّف من ثمانية غليّونات فيزيائية، تمّت الملاحظةُ الدرامية لآثارها في توليد دفقاتٍ نفثية أثناء حوادث الصدم ذات الطاقات العالية.

الصغر من بعضها بعضاً. والعكسُ صحيحٌ في أنّ شدة الاقتران بين الكوارك والغليّون عند المسافات الضخمة تصبح كبيرة جداً. يؤدّي هذا إلى جرّ رهيبٍ يعانيه الحوارك، ويمنع إمكانيةَ فصله وعزله في المخبر. يثبت في النهاية أيضاً أنه بسبب هذا الاقتران (الربط) القوي فإنّ الحالات الكمومية المقيَّدة المؤلّفة من الكواركات لا تستطيع أن تتمكّن من الوجود إلاّ إذا كان لها لون إجماليّ معتدلٌ تماماً، أي إنه يجب عليها تحقيق توازن كامل بين الألوان الكواركية الثلاثة في أيّ لحظةٍ من الزمن. يعني هذا أنه يمكننا فقط امتلاكُ تركيبات $\bar{r}b\bar{y}$ الموافقة للباريونات، أو تركيبات $\bar{r}\bar{b}\bar{y}$ للباريونات المضادّة (نرمز بـ $\bar{q}$ إلى ضدّ لون الـ $\bar{q}$)، أو التركيب الكمومي المعتدل اللون $(r\bar{r} + b\bar{b} + y\bar{y})$ الموافق للميزونات. تفسّر نظريةُ اللون المعياري ـ الـ QCD ـ بشكلٍ أنيق مرتَّبِ الوجودَ على هيئة عيّنة منسَّقة (أو نمط) للجسيمات المتفاعلة عبر القوى الشديدة التي اكتُشِفَت في المسرّعات على مدى العقود الثلاثة الماضية، وهي تفسّر أيضاً سببَ عدمِ إمكانيةِ تحرير الكواركات من سجونها على الإطلاق.

في الوقت الذي يكون فيه من الصعب حساب الخصائص المتعلّقة بالنظرية عندما يكون g_3 كبيراً، فإنّ حقيقةَ صيرورتِه بقيمةٍ صغيرة عند المسافات القصيرة تعني إمكانيةَ إتمامِ حساباتٍ دقيقةٍ نوعاً ما ـ باستخدام مخطّطات فاينمان ـ توضِح حوادثَ الصدم والتبعثر للكواركات المنفردة عند الطاقات العالية. يعني هذا أيضاً أنه عند طاقاتٍ عاليةٍ جداً ـ على سبيل المثال خلال الاصطدامات التي تحدث في تيفاترون مخبر فيرمي (انظر الشكل 33) ـ فإنّ الكواركات والغليّونات المنفردة تصطدم بعضها مع بعض فتخلّف آثاراً قابلة للكشف لحوادث الصدم هذه، إذ يقود ذلك إلى ظاهرة لافتة للنظر تمثّل روايةَ الطبيعة عن الفرار من السجن، وتُعرف باسم **الدفق**

(النفث) **الكواركي** (ومن الممكن أيضاً حدوث الدفق ـ النفث الغليّوني).



الشكل 31: يتسارع الكوارك فيغيّر لونَه من أحمر إلى أزرق، ويصدر غليّوناً (أحمر، ضدّ أزرق)، بحيث يبقى اللون الإجمالي محفوظاً. تبقى قيمتا الطاقة والاندفاع مصونتَين أيضاً.

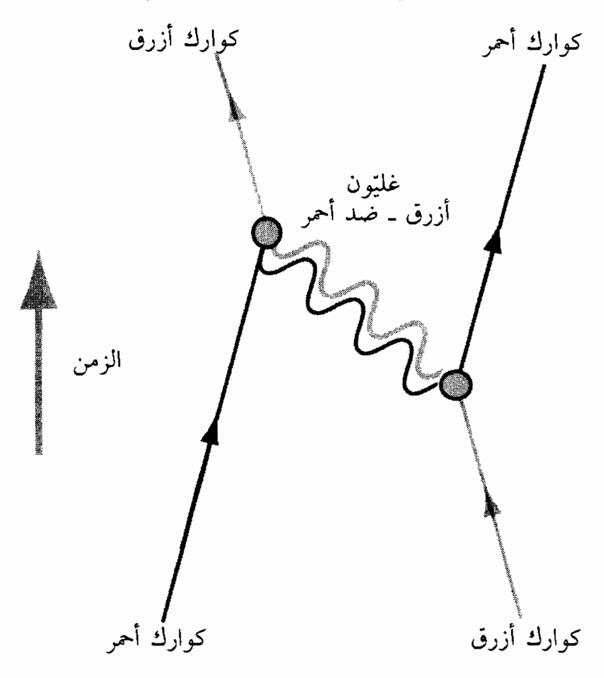
يصطدم في التيفاترون بروتونٌ بطاقة 1 تريليون إلكترون فولط (1 TeV) وجهاً لوجه مع بروتون مضادّ له نفس قيمة الطاقة. يحتوي البروتون على $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ بينما يحتوي البروتون المضادّ على ثلاثة كواركات مضادّة $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$. عند قيم عاليةٍ جداً للطاقات ـ أو خلال فترات زمنية بالغة القصر ـ تتخلخل الروابط بين الكواركات وتتصرّف كما لو كانت

جسيماتٍ حرّةً تقريباً. لذلك تحصل حوادثُ صدمٍ يصطدم فيها عنصرا زوج من الكواركات - مثل u و$\bar{u}$ - وجهاً لوجه. يتبعثر هذا الكوارك والكوارك المضادّ بعضهما عن بعض بزوايا تبعثرٍ كبيرة جداً مندفعَين بعيداً عن البروتون ومضادّه، بينما تستمر بقية الحُطام - أي الكواركات والغليّونات الأخرى للبروتون والبروتون المضادّ الأصليَّين - في الحركة إلى الأمام ضمن اتّجاهها الأصلي - أي الاتجاهَين الأصليَّين للبروتون والبروتون المضادّ - للحركة. ولبرهة وجيزةٍ من الزمن يكون الكوارك والكوارك المضادّ حرَّين يتحرّكان بطاقتَين عاليتَين جداً؛ وبالتالي يكونان جسيمَين نِسبَوِيَّين لدرجةٍ كبيرة، وهكذا يستطيعان الابتعاد عن إخوتهما: الكواركات والغليّونات في حطام البروتون والبروتون المضادّ المُدَمَّرَين، حيث يقطعان مسافةً قد تبلغ مئات الأضعاف من مقاس المسافة التي يكونان محتجزَين خلالها بشكلٍ طبيعي. لقد تمكّنت الكواركات من الفرار والهرب من زنزانات سجنها المحتجَزة فيه، حتى لو كان ذلك لمجرّد فترة وجيزة من الزمن.

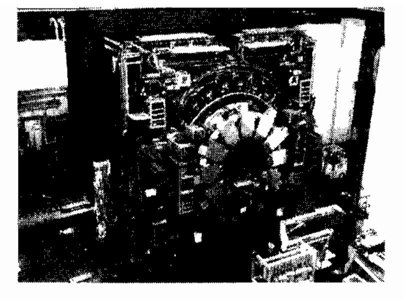
ولكنْ بعد ذلك تسود التفاعلات الشديدة وتتولّى زمام الأمور، فيبدأ الفراغ نفسه بالتحطّم بالقرب من حادثة الصدم. تُخلَق أزواجٌ من الكواركات ومضادّاتها ومن الغليّونات، حيث تنبثق منشقّةً عن الخلاء والفراغ بواسطة الطاقة الهائلة للصدم، فتندفع بلاسما من المادة مضطربةٌ وهائجةٌ - تشبه ما كان موجوداً لحظةَ الخلق الأولى - من نقطة الصدم، وكأنها الذراعُ الطويلةُ للقانون تعتقل الفارّين. تصبح الكواركات المتحرِّرة مكبَّلةً وموثَّقةً بهذا التشويش والهياج للمادة والمادة المضادّة الجديدتَين. وسرعان ما يتمّ أسرُ جميع الكواركات والغليّونات، وتتمّ إعادة فرزها إلى بيونات وبروتونات ونترونات جديدة: لقد انتهت عملية تحرير الكواركات.

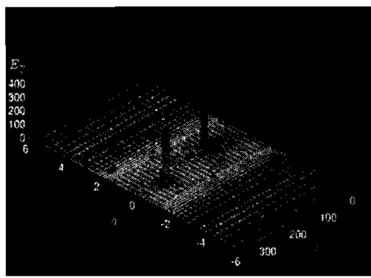
ومع ذلك تبقى طَبْعةُ القَدَم المُتعذِّر محوُها للكواركات الفارّة (انظر الشكل 34). يندفع تيّاران من الجسيمات معرَّفان بوضوح (هما

الدفقان ـ المذكوران أعلاه) ومؤلّفان بشكل غالب من البَيونات خارجَين إلى الفضاء في اتّجاهَي الكوارك u والكوارك المضادّ *u* الفارَّين. يميِّز هذان الدفقان ـ من الجسيمات وبشكلٍ واضحٍ مسارَيهما، ويحملان كاملَ طاقة الكواركات المتحرّرة. وحيث إنّ سيلَي الدفق النفثي هذين يقتفيان آثارَ الكواركات بشكلٍ جليّ، فإنه يمكننا رؤيةُ بنية حادثة الصدم الأصلية وسلوك الكواركات المؤقّت ـ وهي نحتفل بحرّيتها ـ بواسطة كواشِف الجسيمات الضخمة الملتفّة حول المنطقة فائقة الضآلة من المكان التي تحدّد حادثة الاصطدام الأصليّة.



الشكل 32: يتبعثر كواركٌ أحمر على كوارك أزرق. يتبادل الكواركان اللونَ عبر غليّون (أحمر، ضدّ أزرق) يثب ويقفز بينهما مُحدِثاً القوةَ الشديدة. يتمّ تماسك البروتون بفضل التبادل الغليّوني بين الكواركات. يقفز غليّون واحد بين الكواركات في البروتون كلَّ (10^{-24}) ثانية تقريباً.



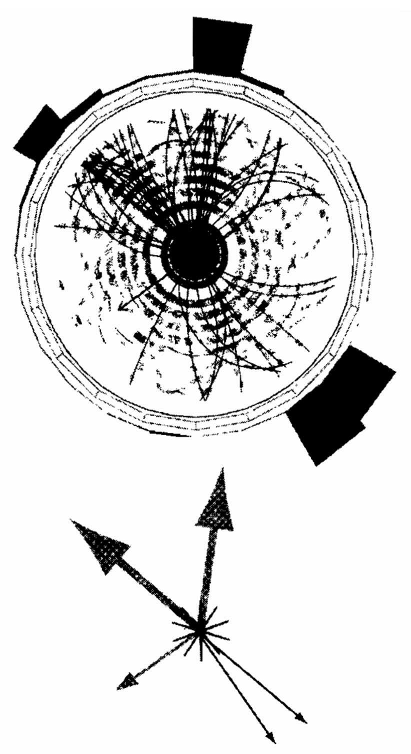


الشكل 33: يُستخدَم جهازا الكشف (الكاشفان) الكبيران (CDF وD ـ صفر) في مخبر فيرمي من أجل مراقبة وملاحظة اصطدامات البروتونات وجهاً لوجه مع البروتونات المضادّة. تمرّ حزمتا البروتونات والبروتونات المضادّة عبر مركز الكاشف CDF المبينَّ في الصورة العليا أثناء إخراجه من أجل تجديده. تتحرّك الحزمتان باتّجاهَين متعاكسَين بسرعةٍ تبلغ 99,9995 في المئة من سرعة الضوء. وقد صُنع الكاشف بشكل برميل ضخم ملتفٌّ حول نقطة الاصطدام في مركز الكاشف. تتضمّن حوادثُ الصدمِ عملياتِ إفناءٍ لكواركاتٍ داخل البروتون وكواركاتٍ مضادّة داخل البروتون المضادّ. تبيّن الصورة السفلية نتيجةَ مثل حادثة الصدم تلك، حيث يمكن تخيّلُ الكاشف فيها كما لو كان أنبوباً أعيد فتحه ونشره بشكل ملاءة وصفحة مستوية. تمثّل المربّعاتُ «بكسلاتٍ» ـ (Dixels) تسجّل مقدار توضّع الطاقة في الكاشِف. يمثّل ارتفاعُ العمود ـ ذي الشكل المشابه لكومةٍ من قطعِ لعبة الليغو (Lego) ـ مقدارَ الطاقة المسجَّلة في ذلك البِكْسِل. تبيّن الصورة حدوثَ اصطدامٍ ينتج عنه إلكترون وبوزيترون فائقا الطاقة، وهو واحدٌ من بضعة حوادثِ الصدم الأكثرِ طاقةً التي رأتها الكائنات البشرية، وهو يسبر بنيةَ المكان نفسَها عند أقصر المسافات التي تمّ تفحّصها عبر التجارب جمعاء، حيث يقل مقاسها عن 1/10, 000, 000, 000, 000, 000, 000 من المتر. (الصورة مُعطاة من مخبر فيرمي).

يمكن للكواركات كذلك أن تفني بعضها البعض بشكل مؤقّت، لينجم عن عملية الفناء هذه غليّون سرعان ما يمزّق الفراغَ منتجاً كواركاً ذروياً ومضادَّه (انظر الشكل 35). تتمّ إعادةُ رسم الآثار المميّزة لعملية تحلّل وتفكّك الكوارك الذروي في كاشِف الجسيمات الأولية الضخم. وبهذه الطريقة يتم جرُّ وسحبُ أثقلِ الجسيمات الأوليّة في الطبيعة أي الكوارك الذروي ـ وهو أحدث كواركٍ انضمّ إلى قائمة «المكتشَفات» ـ من أعماق بحر الخلاء للمادة الدفينة والمخفية التي تحيط بنا. يمثّل الكشفُ عن الكوارك الذروي عمليةَ قبضٍ رائعة واستثنائية، فهو كُسيرةٌ نقطية من المادة ثقيلةٌ كثقل نواة ذرّة الذهب. إنّ هذا الوحشَ الثقيل ـ الكوارك الذروي ـ يتوسّل لنا من أجل إيجاد إجابةٍ عن السؤال: ما هو الشيء الذي يعطي الكواركات واللبتونات الكتلَ التي لها؟

القوى الضعيفة

وصفنا حتى الآن ـ وبشيءٍ من التفصيل ـ ثلاثةً من أنواع القوى في الطبيعة: القوة الكهرمغناطيسية والقوة الشديدة «اللونية» للـ QCD وقوة الثقالة. بقيت هناك قوة أخيرة تعرِّف ـ وبطريقةٍ أكثر أساسية ـ هويّةَ الجسيمات. إنها **القوة الضعيفة** التي يتّحد توصيفُها كتناظر معياري مع القوة الكهرمغناطيسية، فيضعنا ذلك على الطريق المؤدّية في النهاية إلى توحيد جميع القوى. تزوّدنا هذه الصورةُ الإجمالية للكواركات واللبتونات وتناظرات المعيار المعرِّفة لجميع القوى المعروفة ببيانٍ كامل عن مجمل الفيزياء تقريباً لغاية اليوم، وهي تعرِّف لنا ما يُدعى بـ**النموذج المعياري**.



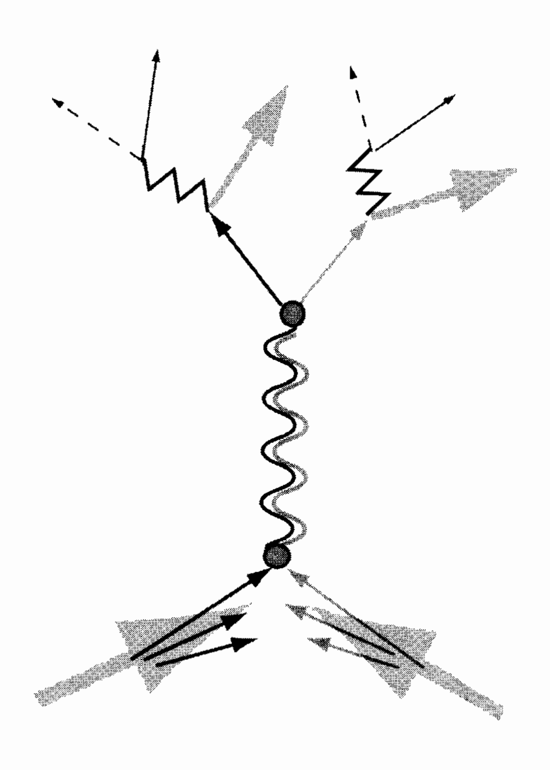
الشكل 34: نرى هنا حادثةَ صدمٍ عندما ننظر في اتّجاه حركة البروتون، حيث يصطدم وجهاً لوجه مع البروتون المضادّ رامياً حُطاماً من جسيمات أوّليّة عديدة ـ تمّ خلقها خلال الصدم ـ نحو الخارج وإلى الكاشِف. يوجد في الكاشِف حقلٌ مغناطيسي قوي يسبّب انعطافَ آثارٍ ومساراتِ الجسيمات المشحونة، ممّا يسمح بالتعرّف عليها. تبينّ الصورةُ السفلية الأجزاءَ الرئيسة طاقيّاً لحُطام حادثة الصدم الخاصّة هذه. نرى هنا لِبتونَين (إلكترون وبوزيترون) وسَيْلَي دفقٍ نفثي من الجسيمات ذات المسارات المتوازية نوعاً ما ناجَمين عن كوارك قعري (جميل) وكوارك قعري (أو جميل) مضادّ. هناك أيضاً مقدارٌ كبير مفقودٌ من الطاقة والاندفاع يضيع بشكل نترينوات منطلقة للخارج. يمكن تفسيرُ هذه الحادثة على أنها حادثة يتمّ فيها خلق زوجٍ من كوارك ذروي ومضادّه، كما هو مذكور في الشكل 35. (الصورة مُعطاة من قبل مخبر فيرمي)

لقد مضى ما يزيد عن خمسة وستين عاماً على تدوين إنريكو فيرمي للنظرية الكمومية الوصفية الأولى عن «التفاعلات بالقوة الضعيفة». في ذلك الوقت كانت القوى التي تمَّ توصيفها هي القوى الضعيفة التي تقوم بفعلها خلال العمليات والإجرائيات النووية، ومنها مثلاً تحلّل (انحلال) بيتا الإشعاعي الذي ـ كما رأينا سابقاً ـ يمكن اعتبارُه البارودَ والذخيرةَ الانفجارية للمستسعرات الحرارية الفائقة (السوبرنوفا). وجب على فيرمي إدخالُ ثابتٍ أساسيٍّ جديدٍ إلى الفيزياء من أجل تحديد الشدّة الإجمالية للتفاعلات بالقوة الضعيفة (تماماً مثلما كان على نيوتن إدخال ثابت الثقالة G_N). في الواقع يُرمَز لثابت فيرمي بـ G_F، وهو يمثّل وحدة الكتل الأساسية التي تحدّد مقاسَ القوى الضعيفة (أي المقياس المناسب لها)، ويساوي هذا الثابت تقريباً 175GeV.

وُجد بعدها أنّ القوى الضعيفة تتضمّن بدورها تناظراً موضعياً لحقل معيار. شكّلت هذه الاكتشافاتُ النظرية لهندسة عمارة النموذج المعياري ـ من قِبل شيلدون غلاشو (Sheldon Glashow) وعبد السلام (Abdus Salam) وستيفن واينبرغ (Stephen Weinberg) الذين تمَّ تحسينُ حساباتهم لاحقاً وصقلُها ضمن نظريةِ حقل من قِبل غيرارد توفت (Gerard ’t Hooft) ومارتينوس فيلتمان(*) (Martinus Veltman) ـ ثورةً في فيزياء الجسيمات حدثت خلال أوائل سبعينيات القرن العشرين، في الوقت نفسه تقريباً الذي لمحنا عنده لأولّ مرّة الكواركات تجريبياً. لقد أُثبت خلال عقد السبعينيات هذا ـ نظرياً

(*) حاز العالِمان الأميركيان غلاشو وواينبرغ والعالِم الباكستاني عبد السلام على جائزة نوبل عام 1977 تقديراً لعملهم في صياغة النموذج المعياري، ثمّ حاز العالِمان الهولنديّان فيلتمان وتوفت على جائزة نوبل عام 1999 تقديراً لعملهما في إثبات الاتّساق الرياضياتي للنموذج المعياري.

وتجريبياً على حدّ سواء ـ أنّ جميع القوى في الطبيعة إنما يحكمها مبدأ تناظري مهيمِن: اللاتغيّر (الصمود) المعياري. وقد رأينا كيفية عمل هذا المبدأ في حالة القوى الشديدة والكهرمغناطيسية.



الشكل 35: إنتاج زوج من كوارك ذروي وكوارك ذروي مضادّ عبر عملية إفناء كوارك علوي (آتٍ من البروتون) بكوارك علوي مضادّ (آتٍ من بروتون مضادّ) من خلال غليّون قائم بالوساطة. يتحلّل لاحقاً الكوارك الذروي إلى بوزون W^+ وكوارك قعري (أو جميل) b (يُحدِث بعدها واحداً من الدفقَين ـ النفثَين). يتحلّل بعد ذلك بوزون W^+ إلى بوزيترون ونترينو. وبشكلٍ مماثل يتحلّل الكوارك الذروي المضادّ إلى جسيمات مضادّة. حيث إنه لا يمكن كشف النترينوات مباشرةً فهي تبرز إذاً كـ «مقدار مفقود من الاندفاع والطاقة».

إذاً ما هو التناظر المعياري الموافق للقوى الضعيفة؟ نرى في كلّ ذرّيّة (جيل) أنّ الكواركات واللبتونات تأتي ضمن أزواج، ونعني بذلك أنّ الكوارك العلوي الأحمر يشكّل زوجاً مع كوارك سفليّ أحمر، وكذلك يشكّل نترينو الإلكترون زوجاً مع الإلكترون، أمّا الكوارك الفاتِن فيؤلّف مع الكوارك الغريب زوجاً، وهناك أيضاً زوج الكوارك الذروي مع الكوارك القعري (أو الجميل) وهكذا. من الممكن أن تكون إجرائية «معايرة التناظر» قد أصبحت مألوفةً بالنسبة إليك الآن، فلنتخيّل إذاً أنّ الإلكترون ونترينوه يمثّلان كائناً واحداً يعيش في فضاء ثنائي الأبعاد، حيث سمَّينا محوراً فيه «محورَ الإلكترون» ومحوراً آخر «محورَ نترينو الإلكترون»، أمّا الكائن الكمومي الجامِع لهما فهو سهمٌ في هذا الفضاء يمكن له أن يشير في أيّ اتّجاه. عندما يشير السهمُ باتّجاه محور الإلكترون يكون لدينا إلكترون؛ ومع تدوير السهم فإنه يمكن لنا الحصول على نترينو. تشكّل الدورانات التي نستطيع إجراءَها على السهم زمرةَ تناظرٍ تُدعى SU(2) (انظر الملحق).

وهكذا يمكننا الآن أن نتخيّل تابعاً موجيّاً لنترينو إلكترون واردٍ بطاقةٍ واندفاعٍ مُعطَيين. نقوم بعدها بإجراء **تحويلٍ معياري** يدوّر هذا التابعَ الموجي ليغدوَ إلكتروناً له شحنةٌ كهربائية سالبة، كما أنه يتلاعب بقيمتَي الاندفاع والطاقة للإلكترون. نحتاج لجعل هذا التحويل موافقاً لتناظر أن نُدخلَ حقلاً معيارياً ندعوه بـW^+ يمكننا إطلاقُه حالاً ليعيدَ قيمتَي الاندفاع الكلّي والطاقة الكلّية إلى قيمتَيهما الأصليّتَين، كما يدير هذا الحقلُ السهمَ الكمومي فيرجعه إلى اتّجاهه الأصلي المعتدلِ كهربائياً والموافقِ لاتّجاه «نترينو الإلكترون». بمعنى ما يقوم حقلُ المعيار بتدوير محورَي الإحداثيات بحيث يعود السهمُ ليصبحَ الآن مشيراً إلى الاتجاه الأصلي بالنسبة إلى منظومة

الإحداثيات، ونعود فنحصل على النترينو الأصلي الذي ابتدأنا منه. يتمّ كلُّ ذلك في تماثلٍ تامّ مع ما فعلناه أعلاه باللون الكواركي، حيث تمّ التعويض عن الدوران المعياري من لونٍ لآخر بإدخال حقل الغليّون.

يثبت في نهاية المطاف أنّ هذا التناظر المعياري يحتاج إلى إدخال ثلاثة جسيمات معيارية هي: W^+، W^- وZ^0، وهذه الجسيمات مرتبطة بشكلٍ وثيق مع الفوتون. في الحقيقة يصبح الإلكتروديناميك ممتزجاً بالتفاعلات الخاصة بالقوى الضعيفة ـ من خلال التناظر ـ ضمن كينونة متّحدة واحدة تُدعى بـ «التفاعلات الكهرضعيفة». على مستوى الكواركات واللبتونات يغدو تحلّلُ النترونُ (المألوف لكم الآن) ـ إذا ما نُظر إليه عبر مجهر فائق القوة ـ عمليةً يتحلّل فيها كوارك سفليّ منفرد ليصيرَ كواركاً علوياً مع إطلاق بوزون W^-. ولكنّ بوزون W^- ثقيلٌ جداً بحيث لا يمكن حدوثُ هذه الإجرائية إلاّ عن طريق مبدأ الارتياب لهايزنبرغ ولبرهةٍ وجيزةٍ من الزمن تكون خلالَها طاقةُ بوزون W^- غيرَ محددةٍ على الإطلاق؛ وسرعان ما يتحلّل ويتفكّك بوزون W^- بعدها إلى إلكترون ونترينو مضادّ. إنّ الكتلةَ الهائلة لـ W^- هي ما يجعل إجرائيةَ التفاعلات بالقوى الضعيفة واهنةً شديدةَ الضعف معتمدةً في حدوثها على حصولِ تراوحٍ كموميٍّ كبيرٍ يتعلّق بالارتياب في الطاقة والزمن. باختصار إنّ ثقلَ بوزون المعيار الضعيف هو السبب في كونِ القوى الضعيفةِ ضعيفةً (انظر الشكل 36).

وهكذا هناك فارقٌ كبير بين الفوتون وبين هذه الحقول المعيارية الجديدة الثلاثة، يتمثّل في أنّ الفوتون جسيمٌ عديم الكتلة بينما جميع جسيمات الـW^+ وW^- وZ^0 ثقيلةٌ جداً. إنّ القوى التي يولّدها التبادل

الكمومي لجسيمات الـW بين الكواركات واللبتونات هي تماماً القوى الضعيفة التي قام فيرمي بتوصيفها قبل حوالي خمس وستين سنة. ولكن ما هو الشيء الذي يسبّب حدوثُه مثلَ هذا الاختلاف الكبير بين الفوتون عديمِ الكتلة وبين جسيمات الـW^+ وW^- وZ^0 الثقيلة؟ كيف يمكن وجودَ تناظرٍ ـ مهما كانت طبيعته ـ بين جسيماتٍ قيمُ كتلها متباينةٌ جداً؟

ويدخل حقل الهيغز

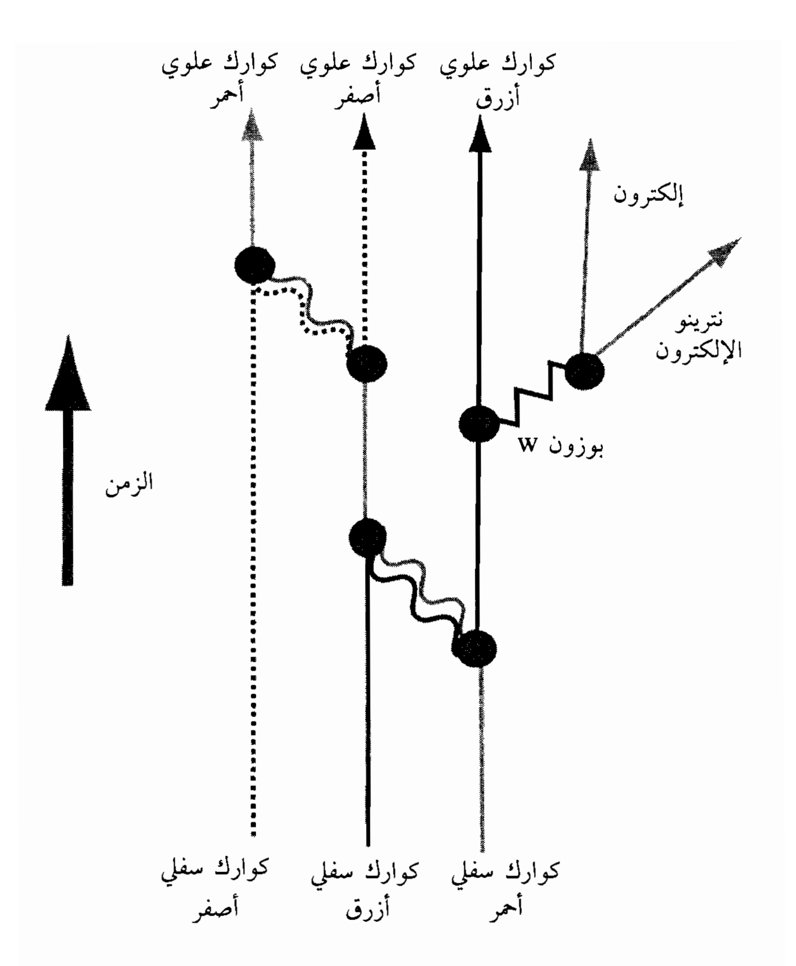
من أجل تفسير كسر التناظر المتعلّق بالقوى الضعيفة نأخذ إشارةَ الحلّ من مجالٍ آخر في الفيزياء. يكون حقلُ المعيار الكهرمغناطيسي ـ الفوتون ـ في خلاء الفضاء الحرّ(*) معدومَ الكتلة تماماً، ولذلك يتحرّك دوماً بسرعة الضوء. نستطيع مع ذلك أن نصنعَ في المخبر وضمن وسطٍ ماديّ نوعاً من «الفراغ المزَيَّف أو المزوَّر»، وهو ما ندعوه بـ**الناقل الفائق**. تمثّل هذه الظاهرةُ شكلاً من أشكال **كسر التناظر التلقائي**، مثل تراصف واصطفاف المغانط أو مثل سقوط قلمٍ واقفٍ على رأسه. في الناقل الفائق ـ الذي غالباً ما يكون مادةً مثل الرصاص أو نيوبيوم النيكل فائقةَ البرودة ـ تصبح الفوتونات ثقيلةً بشكلٍ فعّال بكتلةٍ من رتبة 1 إلكترون فولط. يؤدّي توليدُ الكتلة هذا للفوتون إلى الظواهر الخاصّة بالناقلية الفائقة. كما ذكرنا سابقاً لا تُبدي النواقلُ الفائقة أيَّ مقاومةٍ على الإطلاق لمرور التيّار الكهربائي. يكمن سرّ وجود النواقل الفائقة في إمكانية صنع «حساءٍ كمومي» ضمن المعدن بالغ البرودة، وهذا «الحساء» يتفاعل مع الفوتون. في الواقع يمتلك

(*) غير المحتوي على أيّ حقل كموني.

ذلك «الحساء الكمومي» شحنةً كهربائية، فيشعر الفوتون بهذه الشحنة وبالتالي يكتسب هذا الفوتون «كتلةً فعّالة» ويغدو ثقيلاً قليلاً.

نعتقد ـ مستوحين من ظاهرة الناقلية الفائقة ـ أنّ شيئاً مماثلاً يجب أن يغيّرَ الفراغَ في مجمل الكون، وذلك لإعطاء بوزونات المعيار الضعيفة كتلَها كبيرةَ القيمة. يمكن نمذجةُ هذا الأمر من خلال حقلٍ جديد ـ أي من خلال تابعٍ موجيّ لجسيم جديد ـ يملأ جميع أرجاء المكان. يُدعى هذا الحَقل بـ**حقل هيغز** نسبةً إلى الفيزيائي بيتر هيغز (Peter Higgs) من جامعة إدنبره (Edinburgh)، وهو أحد الباحثين الأوائل الذين بيّنوا كيفيةَ امتلاك شكلٍ معدَّلٍ رياضياتياً عن الناقلية الفائقة للقدرة على أن يفسّرَ مدى وهن القوى الضعيفة وآليةَ حدوث كسر التناظر الكهرضعيف تلقائياً. لقد قِيست شدّةُ حقل هيغز (مدى قوّته[*]) في الفراغ، وتُذكَرُ هذه الشدّة كمقياس طاقةٍ من حيث إنها الأصلُ النظري لـ**مقياس** (أو **قياس**) **فيرمي** البالغ 175 GeV. نحن في هذه المرحلة من العلم نفترض وجودَ جسيم جديد هو بوزون هيغز من أجل تفسير ظاهرةٍ ما، بالرغم من أنه ليس لدينا فهمٌ جيّد عن ماهيّته ولا عن مصدر مجيئه. ومع ذلك يمكننا أن نلقي نظرةً خاطفة على كيفية عمل آلية هيغز.

(*) يُعبَّر ـ بالنسبة إلى المختصّين ـ عن هذا الأمر من خلال قيمة توقّع الفراغ (Vacuum Expectation Value) أو اختصاراً VEV.



الشكل 36: على مستوى الكواركات واللبتونات نرى أنّ عملية تحلّل النترون $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}^0$ تتضمّن الانتقال الكواركي $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}^0$ من خلال تبادل بوزون W معياري. إنّ البوزون W ثقيلٌ لدرجةٍ كافيةٍ تمنع خلقَه بطاقةٍ مساوية لكتلته الهائلة، وبالتالي يتمّ خلقه بطاقة صغيرة لبرهةٍ وجيزةٍ لا غير من الزمن، ضمن ما يسمح به مبدأ الارتياب لهايزنبرغ. يمثّل هذا الأمر حادثةَ تراوحٍ كمومي احتمالُها صغيرٌ جداً، وهذا هو السبب الذي يجعل القوة الضعيفة واهنةً جداً. يبلغ نصف العمر الإشعاعي لنترون حرّ حوالي 10 دقائق.

تحصل جميع الجسيمات المادية والبوزونات W^+ وW^- وZ^0 على كتلها من خلال تفاعلها مع حقول هيغز التي تملأ الخلاء (ولكنّ الفوتون لا يتأثر - بخلاف حالة الناقلية الفائقة - مع هذا الحقل الخاصّ، وبالتالي يبقى عديمَ الكتلة). «تشعر» الجسيمات المختلفة بحقل هيغز من خلال **شدّات اقترانها (ارتباطها)** معه(*). على سبيل المثال، للإلكترون شدّة ارتباطٍ مع حقل هيغز يُرمز لها بـ g_e، وبالتالي تتحدّد كتلة الإلكترون من العلاقة: $m_e = g_e \times 175GeV$ بما أننا نعرف أنّ $m_e = 0.0005GeV$ نجد أنّ $g_e = 0.0005/175 = 0.0000029$. إنّ هذه القيمة تدلّ على شدّةِ ارتباطٍ بالغةِ الضعف، وبالتالي يكون الإلكترون جسيماً ذا كتلةٍ بالغةِ الصغر. أمّا الكوارك الذروي الذي تساوي كتلته تقريباً فإنّ شدّة ارتباطه أو اقترانه مع حقل هيغز تطابق تقريباً قيمة الواحد، ممّا يوحي بفكرة لَعِبِ الكوارك الذروي لدورٍ خاصّ في إجرائية كسر التناظر. هناك جسيماتٌ - مثل النترينوات - بكتلٍ مقاربةٍ للصفر، وبالتالي تكون شدّات ارتباطها أو اقترانها مع حقل هيغز تقريباً معدومة.

مع أنّ كلّ هذا يبدو نجاحاً منقطعَ النظير، فإنّ هناك مشكلة صغيرة تتمثّل في **عدم وجود أيّ نظرية** في الوقت الحاضر حول أصل ثوابت الارتباط - الاقتران مثل g_e. تظهر هذه الثوابتُ كبارامترات دَخْلٍ لا غير في النموذج المعياري. وهكذا نكون لم نتعلّم أيّ شيءٍ جديد عن كتلة الإلكترون، بل فقط استبدلنا بالقيمة المعروفة تجريبياً 0.511 MeV عدداً جديداً $g_e = 0.0000029$.

ينجح النموذج المعياري في التنبّؤ بدقّة بقيم شدّات الارتباط بين

(*) تعبّر - بالنسبة إلى المختصّين - ثوابت اقتران (ارتباط) يوكاوا (Yukawa Coupling Constants) عن هذه الشدّة.

جسيمات W^+ وW^- وZ^0 وبين حقل هيغز. تتحدّد قيمُ هذه الشدّات من خلال القيمة المعروفة لشحنة الإلكترون الكهربائية e، وعبر قيمةٍ لمقدارٍ آخر يُدعى بزاوية المزج (الخلط) الضعيف، ويتمّ قياسها في تجارب تبعثر النترينوات. إذاً يتمّ التنبّؤ (الصحيح) بقيمتَي الكتلتَين M_W وM_Z (لاحظ أن W^+ وW^- هما جسيمٌ ومضادّه وبالتالي تكون لهما قيمةُ الكتلة نفسها؛ أمّا Z^0 فهو مضادٌّ لنفسه) عبر النظرية. يمتلك كلا W^+ وW^- كتلةً تعادل حوالي 80 GeV، أمّا كتلة Z^0 فهي حوالي 90 GeV. لقد تمّ قياس هاتين القيمتَين وبدقّة عالية في تجارب مخبر السيرن (CERN) ومخبر السلاك (مخبر مسرِّع ستانفورد الخطّي SLAC) وفي الفيرميلاب (مخبر فيرمي).

يتحّكم التناظرُ وكسرُه التلقائي من خلال جسيم هيغز تماماً بعمليةِ توليدِ الكتلة لجميع الجسيمات في الكون! ولكن مهلاً: ما هو جسيم الهيغز[10]؟

يُعدّ هذا السؤالُ من أهمّ الأسئلة العلمية في وقتنا الحاضر. قرّرت حكومة الولايات المتحدة ـ وبحكمةٍ بالغة ـ خلال ثمانينيات القرن العشرين إنشاءَ مسرِّعِ جسيمات أقوى بحوالي العشرين مرّة من تيفاترون مخبر فيرمي، وذلك من أجل استكشاف بوزون هيغز بالضبط أو ـ بشكلٍ عامّ ـ من أجل اكتشاف السبب ـ مهما كان ـ وراء آلية كسر التناظر التلقائي للتفاعلات الكهرضعيفة واكتشاف أصل الكتلة. لسوء الحظّ ـ ولأسبابٍ عديدة معقّدة لا علاقةَ لها بالعلم إلاّ من بعيد ـ تمّ إلغاء المشروع سنة 1993. لذلك نحن لا نعرف ما هو جسيم هيغز في الوقت الحاضر، وننتظر بقلق وبلهفة أولى التلميحاتِ

---

(10) تحدّث أحد المؤلِّفين عن جسيم هيغز بصفته «جسيم الله»، وذلك بسبب الأثر العميق الذي تركه علينا وعلى مجمل الكون.

والإشارات عنه أو عن أيّ شيءٍ يماثله من أيّ تجربةٍ كانت وفي أيّ مكانٍ من العالَم.

من المُحتمَل أن تظهر بعض الإشارات عن جسيم هيغز من آلة التيفاترون في مخبر فيرمي (هذه الآلة التي تعمل الآن بشكل جيّد بالرغم من بدايتها التي شكّلت تحدّياً كبيراً نظراً إلى العديد من المشاكل التقنية التي صاحبتها)، أو من آلة المُصادِم الهادروني الكبير (LHC) (Large Hadron Collider) الذي يجري بناؤه الآن في جنيف في سويسرا في مخبر السيرن (CERN) (المخبر الأكبر لفيزياء الطاقات العالية في أوروبا). من المتوقَّع أن يبدأ الـ LHC بأولى تجاربه عام 2008، حيث تتصادم حزمتان من البروتونات كلّ منها بطاقة 7 TeV. بشكلٍ أساسي سوف تعمل هذه الآلة كمجهرٍ بقوّة تكبيرية أكبر بحوالي السبع مرّات من آلة التيفاترون. نتذكّر أنّ تلسكوبَ غاليليو الجديد ذا القوة التكبيرية الأكبر بحوالي العشرين مرّة فقط من العين المجرّدة أدّى إلى فَرْطٍ في الاكتشافات الثورية. لذا لا نتوقّع أقلّ من ثورةٍ مماثلة تنجم عن الـ LHC في مخبر السيرن، بالرغم من أنّ من يعمل منّا في التيفاترون يحاول إحرازَ قصب السبق في اكتشاف أولى الإشارات عن جسيم الهيغز. عندما يبدأ الـ LHC بعمله سيكون المجهر الأقوى في العالَم قد انتقل إلى خارج أميركا الشمالية، وذلك لأول مرّة منذ حوالي القرن.

وهكذا حتى ولو لم نعرف ماهيةَ جسيم هيغز من التجربة، فإنّ هناك نظريات عديدة وكثيرة حول طبيعته الحقيقية.

ما وراء بوزون هيغز: التناظر الفائق؟

ركّزنا خلال الصفحات الماضية على النتائج العميقة للتناظر، حيث تشكِّل نظريةُ نوثر مع مفهوم اللاتغيّر (الصمود) المعياري

العامِلَين الموحِّدَين الكبيرَين في فهمنا لقوى الطبيعة. وارتأينا أن نبقى في غالبية الأحيان تحت مظلّة ما هو معروف، في حين تركنا المعالجاتِ الأعقدَ والأكثرَ ميلاً للتخمين عمّا يمكن وجوده في الأماكن المجهولة من النظرية العلمية إلى الآخرين. مع ذلك يُعتبر الاكتشافُ (المتوقَّع) لجسيم هيغز أمراً فائق الأهمية في العلم بسبب ما يمكن أن يجلبه معه. وفي ما يخصّ جسيمَ هيغز لا يزال علينا إيراد بعض الكلمات الإضافية.

مضى على النموذج المعياري الآن أكثر من ثلاثين سنة، ثبت خلالها كنظرية توصيفية ناجحة لجميع الظواهر المعروفة، ويشكّل هذا الأمر إنجازاً لافتاً للنظر بالنسبة إلى نظريةٍ حول الطبيعة في أيّامنا هذه. علينا أن نُلحِقَ بالنموذج المعياري أوهنَ أشكال القوى: الثقالة؛ بالرغم من أنّ الثقالة نوعاً ما لا تمارس دوراً محسوساً في مخبرِ لفيزياء الجسيمات الأولية. إنّ الثقالةَ جليّةٌ وواضحة في أرجاء الكون الشاسعة وفي بستان التفّاح كذلك، ولكنها ـ ولسنوات طوال ـ تحدّت ووقفت في وجه أيّ تحليلٍ لها عند المسافات القصيرة، حيث تبرز القوى الأخرى وتناظراتها. ولكنّ الثقالةَ جزءٌ من الطبيعة ولها تناظر معياري هندسي، وبالتالي لابدّ من إمكانية دمجها وتضمينها بشكلٍ مناسب ضمن صورة أكبر تخصّ كلّ شيء.

يعتقد جميعُ الفيزيائيين اليوم بضرورة وجودِ بنيةٍ مغلِّفةٍ للنموذج المعياري ذات صلة ببوزون هيغز وفي نهاية المطاف بالثقالة. في ما يخصّ بوزون هيغز، من غير المعقول أن تكون الطبيعة قد زوّدتنا بجسيم واحد وواحد فقط من أجل جعل جميع الجسيمات الأخرى تكتسب كتلةً. ومع ذلك تنسجم جميعُ المعطيات ـ في الوقت الحالي ـ مع فرضية وجودِ جسيم هيغز واحدٍ فقط لم يتم اكتشافه بعد؛ في حين أنّ البقيةَ المتبقّيةَ مَن جسيمات المادة قد تمَّت رؤيتها كلُّها. أمّا

السؤال عن ماهية هذه البنية الجديدة المغلِّفة والشاملة للنموذج المعياري، فلم تتمّ بعدُ الإجابةُ عنه من خلال التجربة التي هي الحَكَم الأخير للمذاق الجيّد (من النظريات) في الفيزياء.

من ناحية علم الكونيات هناك دلائلُ على وجود أشكالٍ جديدة من المادة تقع خارج النموذج المعياري وتقطن كونَنا أي ما يُعرَف بـ**المادة المظلمة**. مضى الآن على ظهور هذه الإثباتات بعضُ الوقت، وهي ترتكز في أساسها على وجود إشاراتٍ وتلميحاتٍ ثقالية للمادة المظلمة في المجرّات وتجمّعاتها، وتعود بعض هذه الدلائل إلى خمسينيات القرن العشرين. هناك أيضاً دلائلُ أكثرُ حداثةً على أنّ كونَنا الآن **كونٌ متسارعٌ** تقوده في ذلك طاقةُ فراغ صرفة، وتشبه مرحلتُه الآن ـ وإن كان هذا بدرجةٍ أخفّ بكثير ـ ما تتوقّعه له نظريةُ التضخّم. علاوةً على ذلك فإنّ السؤال الإجمالي حول طاقة الخلاء هو سؤالٌ صعبٌ جداً، حيث حصل الفيزيائيون خلال محاولاتهم العديدة لحسابها منذ الأيام الباكرة لميكانيك الكمّ على أجوبةٍ خاطئة لها بحوالي 120 قوّة للعشرة (أي $\sim 10^{120}$)!

في الواقع هذه كلّها أمورٌ يقف إزاءَها نموذجُنا المعياري صامتاً. وفي الحقيقة نستطيع بُعَيد ظهيرة يوم أحدٍ ماطر أن نكتبَ سلسلةً طويلةً من هذه الأسئلة المفتوحة، يمكن أن ندعوَ أيَّ واحدٍ منها بأنه «أهم سؤال في مجال العلم»، لأننا ببساطة لا نعرف الأجوبةَ بعد. وبينما يُعدّ التفتيشُ عن بوزون هيغز برنامجَ أبحاثٍ معرَّفاً بشكل جيّد، فإنّ كثيراً من هذه الأسئلة لا يزال مفتقراً إلى تعريفٍ مُرْضٍ، إذ ستعتمد كيفية إجابتنا عنها ـ أو حتى طريقة مقاربتها ـ على ما سنجده بخصوص مسألة الهيغز. ما نحن متأكّدون منه هو فقط أنّ كثيراً من الأمور والظواهر الجديدة ستتجلّى لنا من خلال المراقبات العلمية بواسطة مسرّعات الجسيمات أو بواسطة تلسكوبات الفضاء مثل مقراب هَبْل للفضاء (Hubble Space Telescope).

أمّا في ما يتعلّق بالتخمينات عمّا وراء بوزون هيغز فما أكثرها. أكثرُ هذه التكهنات سيطرةً وشيوعاً إلى حدّ بعيد (مقيسةً بعشرات الآلاف من الورقات العلمية حول الموضوع) هو فكرة **التناظر الفائق** (تُسمّى اختصاراً بـ**سوزي** SUSY). هناك أسبابٌ مقنعة تشكّل أساسَ وأرضيةَ هذه الفكرة التي يمكنها في نهاية المطاف أن تقود إلى توحيد جميع القوى في الطبيعة عند طاقاتٍ عالية جداً (مسافات قصيرة جداً) بما فيها الثقالة. توجد أيضاً مبرّراتٌ وحججٌ لسببِ توقُّعِنا بأن تكون الـ SUSY على صلةٍ بمقياس الطاقة المتعلّق ببوزون هيغز، أي بمقاس فيرمي المساوي لـ 175 GeV، ويمكن أن يأتيَ التوضيحُ التجريبي لهذا الأمر ويغدوَ في متناول اليد قريباً، فيمكن للتناظر الفائق أن يتلاءمَ مع وجودِ بوزون هيغز ويتّسع بشكل طبيعي له، وأن يقدّم تفسيراً جزئياً لسبب جثوم بوزون هيغز عند مقياسِ طاقةٍ من رتبة عدّة مئات من الـ GeV(*). وهناك دلائل وإثباتات غير مباشرة على أنّ الـ SUSY أكثر انسجاماً واتّساقاً مع فكرة «التوحيد الكبير» لجميع القوى من مقارَبات أخرى.

يُعدّ التناظر الفائق في الواقع توسيعاً افتراضياً لكيفية فهمنا للزمان والمكان، فهو يحتوي على أبعادٍ إضافية للمكان طبيعتها «فرميونية»، أي إنّ هذه الأبعاد تتصرّف كما لو كانت جسيمات بتدويم (سبين) - 1/2 (لنتذكّر أنّ الجسيمات بتدويم - 1/2 تُدعى فرميونات). يعني ذلك أنّ لهذه الأبعاد الجديدة نفسِها خصائص

(*) يُدرك المختصّ أن ما يجري التحدّث عنه هنا هو مسألة التراتبية (Hierarchy)، أي مسألة استقرار كتلة الهيغز ضمن مجال طاقاتٍ ضعيف بالرغم من أنّ التراوحات الكمومية التي يخضع لها من مرتبة مقاسات أكبر بكثير، وهذه المسألة مرتبطة كذلك بقضية سبب كون الثقالة أوهن بكثير من القوى الأخرى.

غريبة: على سبيل المثال، عندما يُدفع الفوتون (وهو بوزون بتدويم ـ 1) باتجاه أحد الأبعاد الفرميونية، فإنه يصبح فرميوناً نسمّيه «الفوتينو» بتدويم (سبين) ـ 1/2. وبشكل مماثل يغدو الكوارك (وهو فرميون بتدويم ـ 1/2) ـ عندما يتمّ دفعه باتّجاه بعدٍ فرميوني ـ بوزوناً نسمّيه «سكوارك Squark» بتدويم (سبين) ـ 0. وهكذا يتنبّأ التناظر الفائق بأنه من أجل كلّ فرميون (بوزون) أساسي مُلاحَظ في الطبيعة، لابدّ من وجود «شريك فائق» بوزوني (فرميوني). لم نرَ بعدُ هؤلاء «الشركاء الفائقون» في الطبيعة، وبالتالي إذا كان التناظر الفائق تناظراً صالحاً لَوَجب وجودُ شيءٍ يُخفيه عند الطاقات المنخفضة نسبياً حيث نقوم بمراقباتنا؛ أي ضمن مجال الطاقات «المنخفضة» التي تزوِّدها كلُّ مسرِّعات الجسيمات التي تمّ بناؤها لغاية اليوم. إذاً لابدّ بالتالي من أن يكون التناظر الفائق تناظراً منكسراً في ميدان مراقباتنا الحالية.

إذا ما تمّت ملاحظةُ التناظر الفائق فعلاً في نهاية المطاف ـ ويمكن حدوث هذا الأمر في الـ LHC في السيرن ـ فإنّ قائمتنا الخاصة بمجمل الجسيمات الأساسية سيتضاعف حجمها ـ وبالتالي سيكون هناك عملٌ مؤمَّن ووظيفةٌ ثابتةٌ لفيزيائيي الجسيمات ولأمدٍ طويل ـ إذ سيكون لكلّ جسيم مقابلٌ هو ما نسمّيه **شريكاً فائقاً**. يقدّم التناظرُ الفائق وبطريقةٍ مغريةٍ جسيماتٍ مرشَّحةً لتكون «المادة المظلمة»، وبالتالي يمكن أن تفسّر هذه الجسيمات الملاحظاتِ والمراقباتِ الفلكيةَ عن وجودِ كمّياتٍ كبيرة من المادة غير المضاءة ضمن المجرّات غير الموجودة لا يصدر عنها أيّ إشعاع (ومنه تسمية «المادة المظلمة»)، إذا كانت نظرية التناظر الفائق (SUSY) صحيحةً، فإنها ستمثّل دعماً قوياً لصالح أفكار **نظرية الأوتار الفائقة** كتوحيدٍ نهائي كبير لجميع القوى في الطبيعة بما فيها الثقالة.

تُعدّ نظريةُ الأوتار الفائقة أفضلَ مرشّح حالياً لأن تكون نظريةَ كلّ شيء. لنتذكّر مثالَنا عن وتر القيثارة الَمهتز كاستعارةٍ وصورةٍ مجازية عن الحركة الكمومية لإلكترون مُحتجَز ضمن خندق كمونيّ ذي بعد واحد. تنصّ نظرية الأوتار الفائقة على افتراض أنّ الإلكترون وجميع الجسيمات الأولّية الأخرى هي بالحرف الواحد أوتارٌ مهتزّة. لكننا نحتاج من أجل رؤية هذه البنية الوترية للمادة إلى مجهرٍ أقوى بمئة ألف تريليون مرّة من آلة التيفاترون التي تُعدّ أقوى مسرّعات الجسيمات الحالية.

ما الذي يُقنع النظريين أو يدفعهم إلى الاعتقاد بوجودِ بنيةٍ وتريةٍ لمجمل المادة؟ يكمن سببُ ذلك في أنّ نظريةَ الأوتار تقدر على حلّ مسألة إدخال وإدغام الثقالة ضمن النسيج ذي البنية الكمومية الإجمالية للطبيعة، حيث يكون أخفضُ نمط اهتزاز للوتر الكمومي هو الغرافيتون (كمّة الثقالة). هناك ارتباط ـ اقتران شموليّ بين كلّ أنواع المادة وبين الثقالة، ونظرية الأوتار تنطلق من هذه الحقيقة. علاوة على ذلك نجد أنّ جميع التناظرات المعيارية وكلّ أنواع القوى في الطبيعة يمكن شملُها ضمن هذه الصورة.

تستلزم نظرية الأوتار وجودَ التناظر الفائق. إنها لا تقتضي بالضرورة تناظراً فائقاً في متناول يد التيفاترون أو الـ LHC، ولكن بالمقابل إذا ما تمّ اكتشاف الـ SUSY في المخبر، فإنّ أقوى تصويتٍ بمنحِ الثقة يكون قد تمّ الإدلاء به لمصلحة نظرية الأوتار الفائقة.

هناك عددٌ لانهائي من النماذج الممكنة فائقةِ التناظر عن المقياس الضعيف (أي تفسّر قياسَ كتلة بوزون الهيغز)، ولكنّ واحداً منها فقط أصبح معيارياً: إنه النموذج المعياري الأصغري ذو التناظر الفائق MSSM. يتنبّأ الـ MSSM بأنّ جميع الجسيمات الفائقة الشريكة للكواركات واللبتونات ولبوزونات المعيار يجب أن تكون قابلةً للملاحظة وخلال زمنٍ ليس بالبعيد. يتنبّأ الـ MSSM كذلك

بوجود خمسة جسيمات هيغز فيزيائية قابلة للملاحظة، وهو دقيقٌ نوعاً ما في ما يخصّ القيمة المحتمَلة لكتلة بوزون الهيغز الأخفّ، حيث يضعها ضمن مجالٍ محدّد تماماً بقيمة كتلة أقلّ من 140 GeV تقريباً، وبالتالي فهي تقع في متناول يد تيفاترون مخبر فيرمي - وبالتأكيد ضمن قدرةِ خليفتِه الـ LHC على الكشف - في حال تراكم معطياتِ حوادثَ صدمٍ كافية.

تكمن مشكلة الـ SUSY الوحيدة في أنها لا تقدّم تفسيراً حقيقياً للقسم الأكبر من النمطية النَسقية التي نراها في قيم الكتل وفي الخصائص الأخرى للجسيمات المادية المعروفة (مع استثناءٍ ممكن للكوارك الذروي الثقيل).

يتمّ تحويل تفسير هذه الخصائص إلى نظرية الأوتار وإلى الطريقة غير المعروفة التي يتمّ فيها كسرُ تناظراتٍ مختلفة عديدة عند مقاييسَ طاقاتٍ عاليةٍ جداً لا يمكن الوصول إليها: يمثّل هذا الأمرُ شكلاً من الفيزياء لا يمكن إلاّ لتصوّرات العقل البشري بلوغُه، لأنه ببساطة يمثّل مقياسَ طاقةٍ أعلى بكثير ممّا يمكن رؤيته بواسطة مسرِّعٍ للجسيمات خلال المستقبل المنظور.

إذا لم تتمّ رؤية الـ SUSY عند مقياس الطاقة الموافق لجسيمات هيغز فإنّ ذلك لا يعني تسديدَ ضربةٍ مميتة قاضية إلى الفكرة العامة، لأنّ الـ SUSY كبناءٍ نظري يمكن أن تتسامى لتصبح موجودةً عند طاقاتٍ أعلى وأصعب منالاً، حيث لا يمكن كشفها بسهولة. حتى لو لم يكن للـ SUSY أيّ علاقةٍ بالعالَم الحقيقي، فإنّ هذا لا يلغي حقيقة أنّ التناظرَ الفائق علّمنا الكثيرَ عن رياضيات ميكانيك الكمّ، بحيث سيظلُّ أداةً فكريةً قابلةً للتطبيق وللنمو خلال المستقبل اللامحدود. هناك مقدارٌ كبير من الرأسمالِ الفكري الذي يمكن المراهنة به على الاكتشافات التي ستحدث في العقد القادم.

إذا لم يتمّ اكتشاف الـ SUSY عند المقياس الضعيف، فإنّ بوزون هيغز سيكون على الأرجح كياناً ديناميكيّاً، ربّما له صلةٍ بقوى جديدةٍ في الطبيعة. على سبيل المثال، درس كثيرٌ من المنظرين إمكانيةَ أن يؤدي الكوارك الذروي ـ مع هذه القوى الجديدة الإضافية ـ دوراً محورياً في إقرار وتعيين المقياس الطاقي للتفاعلات عبر القوى الضعيفة، وبالتالي في تحديد كتل الجسيمات الأولية أيضاً. يمكن في مثل هذه الحالة أن يكون بوزون هيغز حالةً مقيَّدة تحوي مثلاً كواركاً ذروياً وكواركاً ذروياً مضاداً، يتماسكان مع بعضهما بعضاً عبر تفاعلاتٍ معيارية جديدة. لو كان مثل هذا المخطَّط الديناميكي صحيحاً، فإنه سيوجِّه تفكيرَنا في اتّجاه جديدٍ تماماً، ومن جديد سوف تكون التجربة هي الحَكَم النهائي على صحة تلك الأمور أم لا.

تعليقات فلسفية

تُعدُّ فيزياءُ الطاقات العالية التي تدرس القوى وسلوكَ المادة وبنيتَها عند مقاييس المسافاتِ القصيرةِ بمثابة الفحص المجهري (استعمال المجهر كأداة بحث) المُثالي والنهائي، إذ تحكُم قوانينُها الكونَ برمّته. بمعنىً من المعاني نحن الآن نتفحّص ونتوصّل إلى فهم «الشيفرة الوراثية» ـ أي الدنا (DNA) ـ للمادة نفسها. ما الذي يمكن أن يكون أكثرَ أساسيةً من هذا؟ إنّ الإجابة عن السؤال المتعلّق بكسر التناظر المعياري الضعيف وبأصل المادة يمكن أن تأتيَ عبر التجربة خلال وقتٍ ليس بالبعيد ـ ربّما في أثناء العقد القادم ـ حيث من المحتمل أن يحتاجَ ذلك إلى مقاييس طاقاتٍ يستطيع بلوغَها المصادمُ الهادروني الكبير LHC في السيرن. ويمكن في يوم ما من أيام المستقبل أن يتمّ بناء مسرِّعات أكبر من الـ LHC، ولنَقُل مثلاً في صحراء غوبي (Gobi) في الصين.

نتوقع إذاً قدومَ ثورةٍ كبيرةٍ في علم فيزياء الجسيمات الأولية. في الماضي ساهمت مثل هذه الثورات في إغناء المعرفة البشرية وفي تحسين شروط الحياة البشرية في شتّى أرجاء الأرض. خلال القرن العشرين جنت الولاياتُ المتحدة بشكل خاصّ الثمارَ الوفيرة الآتية من الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا بفضل جامعاتها المرموقة ومخابرها البحثية القائدة في جميع مجالات العلوم. من المستحيل التنبّؤ بالأثر الذي سوف تُخلّفه الاكتشافاتُ المستقبلية عند أقاصي ما يتوصّل إليه العلم في مجال الطاقة، فهكذا هي طبيعةُ البحث في العلوم الأساسية. ولكنْ لا يوجدُ أيُّ سببٍ يدفعنا للاعتقاد بأننا وصلنا إلى نقطةٍ سيبدأ عندَها المردودُ من الاستثمارات في مجال البحوث في العلوم الأساسية بالتناقص. في جميع الأحوال سيكون العقد القادم عقداً مهمّاً ومثيراً بالنسبة إلى سعي الإنسان لفهم أعمق أسرار الكون الدفينة.

تنتهي الملحمةُ الأوبرالية لفاغنر(*) (Wagner) والمسّماة دورة الخاتم(**) بـ **غوتردامرنغ** (Gotterdammerung) أي «شفق الجبابرة

(*) ريتشارد فاغنر (1813 ـ 1883): موسيقار وكاتب ألماني وقائد أوركسترا ومخرج مسرحي، معروف خاصةً بأعماله الأوبرالية الضخمة.

(**) دورة الخاتم (The Ring Cycle): ملحمة أوبرالية تتألّف من أربعة أجزاء ألّفها ولحّنها فاغنر خلال ستة وعشرين عاماً، ويستغرق عزفها وتمثيلها حوالي خمس عشرة ساعة. تدور القصّة التي استقاها فاغنر من قصص الفولكلور الألماني والإسكنديناڤي عن سرقة الخاتم الذهبي السحري ـ المانِح للسلطة على العالَم لمن يمتلكه ـ من نهر الراين (اسم الجزء الأول: خاتم نهر الراين الذهبي (Das Rhinegold))، حيث تحاول الآلهة امتلاك الخاتم، ويفوز البطل سيغفريد (Siegfried) (اسم الجزء الثالث: سيغفريد) بمبتغاه ويحصل على الخاتم ولكن تتمّ خيانته ثم مقتله، وأخيراً تُعيد برنهيلدا (Brunhilde) حبيبة سيغفريد صاحبة الفرس غرين (Grane) ذات القوائم الثمانية ـ وهي فالكيري أي من تلك الفتيات الأسطوريات اللواتي تخترن من يُصرع من أبطال المعارك (اسم الجزء الثاني): (Die Walkure) الخاتمَ إلى حوريات الراين اللائي تبتدئ الملحمة وتنتهي بهنّ في الجزء الرابع: شفق الجبابرة (غروب الآلهة) =

(غروب الآلهة)». تقفز هنا برنهيلدا (Brunhilde) إلى الموت وهي ممتطية فرسها وموضع ثقتها غرين (Grane)، وذلك كي تعيد الخاتم الذهبي إلى نهر الراين (Rhine) بعد أن كان مصدراً لكثيرٍ من المشاكل والكوارث خلال الخمس عشرة ساعة السابقة من عزف وأداء الأوبرا. ومع تتالي التضحيات والقرابين المثيرة لاحقاً، تحترق فالهالا وتُفني الآلهةُ بعضَها بعضاً، فلا تترك أثراً إلاّ في الأساطير المحرَّفة للبشر غير الخالدين. ينجو البشر في النهاية رغم أنهم يكونون متألِّمين ومتعذِّبين وغيرَ مدرِكين تماماً لماهية الأشياء، ومع ذلك يستمرون في حياتهم وهم يركضون لاهثين وراء مشاغلهم الدنيوية.

قد يكون كلّ هذا استعارةً وصورة مجازية عن «ألم الفراق» وعن الرغبة الملّحة الدفينة لدينا بالالتحام مع من يرعوننا، وقد يكون نوعاً من النصيحة من أجل التصرّف بحكمةٍ مخافةَ التعرّض للاندثار، أو ربّما يعكس أمراً إلزامياً يشبه حادثة تناول الفاكهة المحرَّمة (التفاحة) والخروج بسببها من جنان عدن. ومهما كان معنى ذلك فإنّ قدرَنا هو أن نذهب إلى أبعد من مجرّد أساطير الخلق الخيالية، وأن نستبدلَ بها شيئاً آخرَ أكثر ديمومةً وعقلانية.

عندما قاد جيمس لوفاين(*) (James Levine) أداءَ دورةِ الخاتم على مسرح (دار أوبرا) الميتروبوليتان أوبرا قبل حوالي العقد من

= (Gotterdammerung) الذي يعبّر عن معركةِ القيامة حيث تتدمّر الآلهة وتفنى خلالها، أمّا القاعة فالهالا (Valhalla) التي اختارها رئيس الآلهة لتكون مكاناً للأبطال الذين قُتلوا فإنها تُحرَق وتُبادُ عن بكرة أبيها.

(*) قائد أوركسترا وعازف بيانو أميركي، وُلد عام 1943، وهو مدير مسرح الميتروبوليتان أوبرا (Metropolitan Opera) في نيويورك، كما أنه قائد الأوركسترا السيمفونية لمدينة بوسطن.

الزمن، تمَّ تصوير تحطّم قاعة فالهالا على أنها انفجارٌ لسوبرنوفا. أضاء هذا الانفجارُ الهائل أرجاء السماءَ في أثناء الليل الدامس، ثمّ تضاءل وتلاشى مثل الألعاب النارية التي تستخدم في الاحتفالات، ممّا أثار ذهولَ كل الحاضرين (البشر الهالكين وغير الخالدين في الأسفل). لقد كانت لحظةً عظيمةً موسيقياً وبصرياً.

عندما بدأنا قصة التناظر ذكرنا أنّ «شفقَ الجبابرة» («غروب الآلهة») ـ أي غروب ونهاية هذا الصنف من الكائنات الإلهية ـ إنما هو استعارةٌ عن وحوش الطبيعة الفلكية الضخمة: تحترق جبابرة المجرّات ـ التي تبلغ كتلتُها حوالي مئة ضعفٍ من كتلة الشمس ـ مصدرةً ضوءاً ساطعاً وتستهلكُ سريعاً وقودَها الاندماجي، ثم تتحطّم في نهاية المطاف خلال متتاليةٍ من التضحيات والقرابين بطريقة **المستسعرة الحرارية الفائقة (السوبرنوفا)**: الانفجار الأكثر حدّة وضخامةً والأكثر هياجاً وإثارةً للذهول في الكون منذ حدوث الانفجار العظيم. يتّم حدوثُ كلّ هذا بفضل أوهن أنواع القوى في الطبيعة مع جسيماتِها الصغيرة التي تقودها بأُوركسترالية وتناغم التناظراتُ العميقة التي تعرّفها وتحدّد ديناميكَها. ما هو المغزى أوَ الشيء ذو الديمومة المستمرة الذي سيبقى ما بعد هذه الغوتردامنغ؟ وما هو الدرس الذي علينا نحن البشر الفانين تعلّمُه هنا؟

سوف تستمرّ قوانينُ الفيزياء السرمدية التي يكتشفها الذكاء والفطنة البشريان. وبشكل موازٍ سوف يستمرّ البحث عن فهم جميع هذه القوانين وإدراكها، ومن الأرجح ألاّ يتوقّف هذا البحث أبداً ما دمنا موجودين. من المحتمل ألاّ توجد «نظرية كلّ شيء» شاملة وكاملة العمومية، مما سيجعلنا نقول (الكلمات الأخيرة المشهورة؟): ستكون هناك دوماً نظريةٌ غيرُ قابلة للبرهان عليها، أو مقياسُ طاقة عالٍ غير معروف ولا يمكن للمسرّع بلوغَه، أو حدودٌ للوعي البشري

أو حجابٌ نصفُ شفاف يبرز خلال لحظةٍ ذات صلة بالخلق فلا تُرى فيها إلاّ الخيالات. بالرغم من ذلك فقد استمرّت الطبيعةُ مع قوانينها الأبدية بالسماح لنا حتى الآن برؤية جزءٍ لا أكثر من الشيء الإجمالي. ومع أنّ نظرية كلّ شيء لا تزال متملّصةً منّا، فإننا قد تعلّمنا اللغة التي نبحث بها عنها. وهكذا مهما كانت الإجابات الجديدة التي نجدها، ومهما ازدادت الأسئلة العميقة عن طبيعة الكون أو عن بنية نسيجه الرياضياتي، فإنّ ما هو موجود في المركز سيكون دائماً: التناظر.

خاتمة من أجل المُربّين

إنّ العالَم الذي نعيش فيه فائق التعقيد، والتحديات التي تواجهنا أكثر صعوبةً وإلحاحاً من أيّ وقتٍ مضى، فهي تبدو أحياناً قاهرةً لا مناص منها. إنّ الطرق المتوفّرة لحلّ مشاكل العالَم موجودة، ولكنها تتضمّن استخدامَ تقنياتٍ متقدّمة ليست في متناول الناس العاديين في غالبية الأحيان. من أجل ذلك لا يتوجّب علينا التصرّف بسرعة لمواجهة تدّني نسبة المشاركة العامة في المجالات الساعية لفهم تكنولوجيا العلم والهندسة فحسب، بل يجب علينا كذلك تقديم نظرة أكثر جودةً وغنى عن القضايا الأساسية المفتاح بالنسبة إلى موضوع ماهية العلم ـ أي عن كيفية عمل فلسفته الطبيعية ـ المبنية على قواعد المنطق والمنعكسة في قوانين الطبيعة. في الحقيقة يعتمد مستقبلنا وبشكلٍ حاسم على هذا الأمر.

سيصادف ويتعثّر أيّ زائر للفيرميلاب العزيز على قلوبنا ـ إذا لم يكن حذراً ـ بالتناظر بمجرَّد دخوله من البوابة الرئيسية للمخبر(*). لقد

(*) توجد في أنحاءٍ متنوعة من مخبر الفيرميلاب عدّة أعمال نحتية كبيرة صمّمها روبرت ويلسون المدير الأول للمخبر، وأهمّها عمل التناظر المنكسر (Broken Symmetry) الواقع عند المدخل الرئيسي من ناحية شارع الصنوبر (Pine Street)، وهو بشكل قنطرة ثلاثية =

حاز مفهومُ التناظر ـ مع أنه كان معروفاً من قبل القدماء ـ على مكانته الراهنة من حيث السيطرة والهيمنة على العلم مُذْ برزت للعيان نظرية ألبرت إينشتاين في النسبية الخاصّة، فقد تعرّف إينشتاين عام 1905 على دور التناظر ـ الذي كانت روعته وبساطته من الدعائم الجمالية لفنّ العمارة والنحت والموسيقا ـ كعنصرٍ حاسمٍ في الوصف العلمي للكون.

في أيامنا الحالية نرى التناظرَ يمثّل التحفة التزيينية الأساسية الموضوعة في مركز المنضدة الرئيسية لقاعة العشاء الكبيرة التي تجلس حولها جنباً إلى جنب كلّ من الفيزياء التقليدية (الكلاسيكية) والحديثة والرياضيات والفلسفة في جمالٍ وتناغم يحيطان بنا من كلّ الجوانب في الطبيعة والموسيقى والفن. عند تلك المنضدة تجلس إيمي نوثر مع دايفد هيلبرت وكذلك إينشتاين، بعد أن سلّمتنا عهدةً وتراثاً من الأفكار الأكثر تنويراً واختراقاً في مجال المعرفة البشرية: نظريتها الرائعة وفائقة الأهمية في فهم القوانين الديناميكية للطبيعة. لقد كانت نوثر بلا شكّ رياضياتية من أعظم الرياضياتيين في التاريخ، ومع ذلك كانت هادئة متنسّكةً ولطيفةً جداً. للأسف لم يسمع بها من خارج ميدان الرياضيات والفيزياء إلا القلّة من الناس، مع أنها تستحقّ أن تُعتبَر مثلاً أعلى لأيّ شخص منا.

إنّ حالةَ الفيزياء الأساسية ـ التي تُعنى بالفضاء الداخلي للجسيمات الأولية والفضاء الخارجي للفلك والكونيات ـ اليومَ تجمع بين الحيرة التامة وبين الإثارة منقطعة النظير. إنّ الهواء نفسه في المخابر وفي الجامعات ذات الصلة يهتّز ويترجرج بسبب التوقّعات

= تبدو متناظرةً تماماً إذا نظرت إليها من الأسفل ولكنها في الحقيقة ليست كذلك إذا ما نُظر إليها من زوايا أخرى.

المرتقبة عن اختراقات درامية في فهم تاريخ وتطوّر الكون وفي الكشف عن الطبقة التالية من المبادئ التعريفية للطبيعة. نحن متأكّدون من أنّ القوانين المكتوبة للفيزياء سوف تتغيّر وبشكلٍ محسوس خلال السنوات العشر القادمة عمّا هي عليه الآن.

لقد انطلقت فكرة تأليف هذا الكتاب أولاً من خلال برنامجٍ لإقناع المعلّمين في المدارس الثانوية العلمية بأن يُدخلوا بعضاً من الأفكار المهمّة للتناظر في لبّ مناهج الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا. فكّرنا في البدء بأن نكتب بضع فقراتٍ تعرّف التناظر، وتنقل ـ على الأقلّ إلى الأستاذ المعلّم ـ الأسبابَ التي جعلت التناظر يهيمن في الميادين التي تعتبَر أقصى ما توصّلت إليه الفيزياء الحديثة وجعلته يجلب معه مفاهيمَ مهمّة وخصبة إلى قاعات صفوف الفيزياء والكيمياء والبيولوجيا. ثمّ أنشأنا موقعاً إلكترونياً على شبكة الإنترنيت: www.emmynoether.com <http://www.emmynoether.com> لنشر المواد التي نكتبها على نحو أوسع. ولكنّنا في نهاية المطاف تأكّدنا من أنّ الأمر يتجاوز رغبتنا بمنهاج أفضل للفيزياء يتمّ تدريسه في المدارس الثانوية أو خلال السنوات الأولى من التعليم في الكلّيات، وذلك لأننا نعتقد أنّ بذلَ الجهود من أجل زيادة معارف الجمهور العامّ بمضامين العلوم هو في حدّ ذاته هدفٌ نبيلٌ وطموحٌ مشروعٌ وأساسيٌّ مثل التعليم في المدارس للطلاب، ومن هنا قرّرنا توسيع شريحة الناس الذين نرغب بالتوجّه إليهم. أصبحت غايتنا إذاً أن نخدم كلا الهدفَين بحيث يستطيع كثيرٌ من طلاّبنا الصغار ورفاقنا الكبار ـ الذين بدأوا يهتمّون بكلّ تلك الضجّة عن نظرية الأوتار الفائقة وعلم الكونيات الحديثة ـ أن يجدوا في كتابنا مكاناً للبدء منه.

نعتقد أنّ الأفكار التي نقلناها في هذا الكتاب ستصبح ضروريةً لاكتساب ثقافة تحارب الجهل والأمّية في مجال العلوم لطلابنا

وأساتذتهم ـ بالإضافة إلى الجمهور العامّ كذلك ـ من أجل تقدير وتخمين إلى أين سيتّجه العلم. نعرف من خلال تجربتنا الكثيرَ عن الشعور بالإثارة وعن العواطف الجيّاشة التي تتولّد لدى جميع الناس ـ الصغار والكبار ـ عند سماعهم للقصص عن المادة المضادّة والثقوب السوداء والنترينوات والكواركات. ونحن نضيف الآن إلى المواضيع «الحارّة» هذه (التي يمكن تهييجها بكبسة زرّ لا غير) موضوعاتِ التناظر بكلّ أشكاله: تناظرات الزمكان والتناظرات المعيارية والتناظر الفائق وتحدّي تناظر الـ CP وكثيراً من شرائح الخبز والزبدة الأخرى الموجودة في الفيزياء النظرية الحديثة.

إننا نأمل من خلال تزويدِ قرّائنا بلمحاتٍ خاطفة عن حياة العلماء أثناء عملهم ـ نوثر وإينشتاين وماكسويل وبوهر وفيرمي ـ أن نؤكّد عبر فكرة التناظر المتكرّرة على أنّ التقدّم في العلم يعتمد على الخيال والإلهام والوحي وعلى إخلاص وتفاني العلماء في عملهم. ولقد كانت حافزاً قوياً لنا الرغبةُ في أن نجعل الآخرين يشاركوننا حماسَنا وأن ننقل لهم القصصَ ومعنى المغامرة، وبشكلٍ يفوق كلّ ذلك الرغبةُ في نقل طريقة التفكير التي يمكن للتجربة العلمية أن تقدّمَها ـ ولو بالنيابة ـ إلى القارئ العامّ.

لدينا إيمان راسخ بأنّ طريقة التفكير هذه ـ وهي التي سبَّبت تحريرَ العلم لطريقة تفكيرنا من مُعيقاتها وتقييدَه لها على حدّ سواء ـ يجب أن تُدرَّس في كافة المدارس منذ روضة الأطفال حتى المرحلة الثانوية. إنّ جميعَ الطلاّب إذا ما تمَّت إحاطتهم وترسيخ معرفتهم بمجموعةٍ سوّية غير مشوَّهة من دراسات الرياضيات والعلم المتّسق، فإنّ طريقة التفكير هذه سوف تبرز تلقائياً عندهم لتهيّئ طلاب الدراسات العليا وترشدهم في طريقهم نحو مهنهم المستقبلية.

وسيضيف التناظرُ ـ ذلك الإطار الذي ينطوي تحت لواء خيام

العلم الممتدّة ـ ومضاتِ الوضوح المقدّسة التي لا تُقدّر بثمن، ممّا سيمنح جميعَ القرّاء الشعورَ بأنّ هذه هي الطريقة الحتمية التي لابدّ للعالَم من أن يسير وفقها.

لو فكّرْنا مليّاً في ما نحاول نحن البشر أن نفعلَه، سيتبيَّن لنا أننا نحاول بكل ما أوتينا من جهد ـ ورغم الضباب الذي يكتنفنا ـ أن نتوصَّل إلى رؤية كيفية صياغةِ التناظراتِ لأفكارنا ومعادلاتنا، وذلك كي تجسِّدَ قناعاتنا بأنّ سحرَ هذه التناظرات وجمالَ إيقاعاتِها ـ وحتى عيوبَها ـ سوف تظهر لنا في النهاية ـ مع الزوال البطيء للضباب ـ جمالَ وأناقةَ الكون الذي نعيش فيه.

الملحق

زمر التناظر

رياضيات التناظر

دعونا نفكّر وبشكلٍ محسوسٍ بالتناظرات التي يمتلكها كائن هندسي بسيط جداً هو المثلث متساوي الأضلاع. إنه مثلث بأضلاعٍ ثلاثة متساوية في الطول يلتقي بعضها مع بعض عند نقاطٍ ثلاثٍ تُدعى بـ**الرؤوس** (**القمم**). يقدّم لنا المثلث متساوي الأضلاع مثالاً بسيطاً - وإن كان ليس بديهياً - عن التناظر. يمكننا رسم مثلثات متساوية الأضلاع فوق أيّ سطحٍ تقريباً باستخدام أقلامٍ ملوّنة أو أقلام رصاص، ويمكننا جعل هذه المثلّثات كبيرة أو صغيرةً بالمقدار الذي نشاء، كما نستطيع أن نضع هذه المثلثات في أيّ مكان شئنا وبأيّ اتّجاه كان (مثلاً برأسٍ يتجّه إلى الأعلى أو برأسٍ يشير إلى الأسفل أو أيّ شيءٍ آخر).

لجميع هذه المثلثات متساوية الأضلاع - وبقطع النظر عن لونها أو حجمها أو موضعها أو اتّجاهها أو أيّ شيءٍ آخر - سِمةٌ عامة وتجريديّة تحدّد التناظر الوحيد الذي لها: أي التناظر الذي يعّرِف

ماهيّة المثلث متساوي الأضلاع أو ماذا نعني به. لو استطعنا بطريقةٍ ما إبلاغ قاطني كوكب المرّيخ بجوهر تناظرِ مثلثٍ ما متساوي الأضلاع، لاستطاعوا إعادة إنشاء ما نحن بصدد الحديث عنه، ولكنهم لن يعرفوا لا حجم ولا لون ولا موضع هذا المثلث الذي أبلغناهم عنه. ورغم ذلك لن يكون هذا مهماً، فالتناظر الخاصّ الموصوف أعلاه هو جوهر ما نعنيه بمثلث متساوي الأضلاع، لذلك دعونا نجد طريقةً غير بصرية لوصفه.

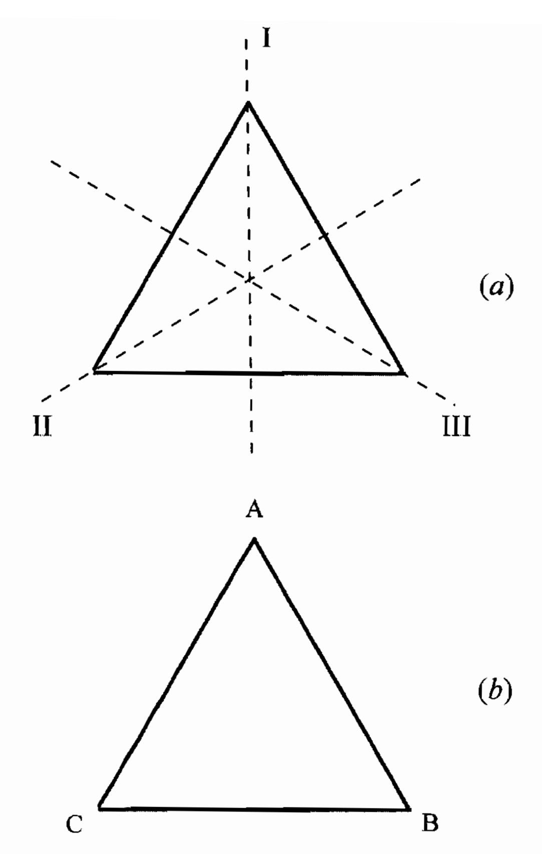
من المفيد مقاربة هذا الأمر تجريبياً (إذا استطعتَ تخيّل وتصوّر العمليات التالية فهذا حسن، ولكننا نشجّعك على أن تجري هذه التجارب الصغيرة بنفسك أو أن تقوم بها في قاعة صفّ... إلخ). لنرسم مثلثين متساويَي الأضلاع متطابقَين تماماً (انظر الشكل م 1) وليكُن كلّ منهما على ورقة شفافة. يمكننا كبديل عن ذلك أن نرسم كلاً من المثلثَّين على لويحة بلاستيكية شفّافة نظيفة لمِسقاطٍ (في حال توفّره)، ويمكننا أن نرسمهما كـ «كائنَين» منفصلَين ضمن برنامج حاسوبي محرِّرٍ للمخطّطات يسمح لنا بتحريكهما فنسحبهما أو ندوّرهما أو نضع أحدهما فوق الآخر وهكذا.

نرسم المثلّثَين بسعتين متطابقين متطابقَين يمكن وضع أحدهما فوق الآخر بحيث تنطبق الأضلاع والرؤوس بعضها على بعض بالضبط. لنتصوّر أنّ «المثلث المرجعي» - أي المثلث التي تمثّل محاورُ أضلاعه محاورَ إحداثياتٍ ثلاثة - قد ثُبِّت بحيث لا نستطيع دفعَه أو تغييرَ موضعه بطريق السهو. يجب التفكير بالمثلث المرجعي إذاً على أنه يمثّل بالنسبة إلينا «منظومة الإحداثيات»، وهو يفيدنا كأداة «فاحصة» في تجربتنا. متى ما وضعنا المثلث المرجعي في مكانه فلن نحرّكَه بعدها، أمّا «المثلث التجريبي» الذي نرمز لرؤوسه بـ A, B, C فهو «متغيِّرنا». يمكننا تحريك المثلث التجريبي بحرية، فنسحبه

وندیره ونضعه فوق المثلث المرجعي مطابقِين الرؤوسَ والأضلاعَ للمثلّثَين بالضبط. لقد رمزنا لرؤوس المثلث التجريبي بـ A, B, C ولمحاور المثلث المرجعي بـ I, II, III من أجل تقفّي أثر ما سوف نفعله بهدف تعيين العمليات التناظرية الممكنة.

لنبدأ الآن تجربتَنا؛ نضع أولاً المثلث التجريبي فوق المثلث المرجعي بحيث نقرأ رؤوسَ الأول بالترتيب ABC في الاتجاه الموافق لحركة عقارب الساعة مع كون الرأس A في الأعلى، وندعو هذا الوضع بـ**الوضع الابتدائي**. نرغب بأن نجد **جميع الطرق الممكنة والقابلة للتمييز بعضها عن بعض** التي يمكن لنا بها رفع المثلث التجريبي ثم إنزاله من جديد ليتوضع فوق المثلث المرجعي. يُدعى أيٌّ من هذه العمليات بـ **عملية تناظر** أو بـ **تحويل**. كيف ننفّذ هذا الأمر؟

ندير أوّلاً المثلث التجريبي حتى تصبح رؤوسُه بالترتيب CAB في اتجاه عقارب الساعة وابتداءً من الأعلى. يسمح لنا ذلك بوضع المثلث التجريبي فوق المثلث المرجعي، وبالتالي يوافق ما فعلناه عمليةَ تناظر هي عبارة عن دوران بـ 120 درجة (أو ما يكافئها 2d/3 راديان). سنرمز إلى عملية التناظر الأولى هذه بـ R_{120}. يمكننا إذاً هنا أن نبدأ بكتابة قائمةٍ من عمليات التناظر، ويمثّل التناظرُ المذكور أعلاه اكتشافَنا الأول.



الشكل م1: المثلثان اللذان نستخدمهما في تجربتنا a: «المثلث المرجعي» ونرمز لمحاوره بـ I, II, III؛ b: «المثلث التجريبي» ونرمز لرؤوسه بـ A, B, C.

من المفيد التفكير بجملتنا التجريبية كأنها نوعٌ من «آلة حاسبة ـ للجيب». يمكننا أن **نعيد** المثلثَ التجريبي إلى وضعه الابتدائي، وتشبه العودة هنا الضغط على زرّ «المسح» في الآلة الحاسبة ـ للجيب من أجل البدء بحسابٍ جديد. ما هي عمليات التناظر **القابلة للتمييز** التي يمكننا إجراؤها غيرَ التي فعلناها؟ من الواضح أنّ إدارة المثلث بزاوية 240 درجة (أو $4\pi/3$ راديان) هي

عملية تناظر جديدة تعطي النتيجة BCA. وهكذا نكتشف عمليةَ تناظرٍ ثانية قابلة للتمييز ندعوها R_{240} يمكننا إضافتها إلى قائمتنا.

هل هناك عمليات تناظر أخرى؟ ربّما تكون قد أخذت بعين الاعتبار الدورانَ بزاوية ـ 120 درجة (أي 2π/3 ـ راديان) الذي نرمز له بـ R_{-120}. نرى أنّ هذه العملية تأخذ المثلث إلى الوضع BCA (انطلاقاً من الوضع الابتدائي بالطبع). هل يجب أن نعتبر هذا الدوران عمليةَ تناظرٍ جديدة ومنفصلة أم أنّ العملية R_{-120} مكافئة للعملية R_{240}؟

في الحقيقة إذا كنا سنميّز بين العمليّتَين R_{-120} وR_{240} أو بين R_{-480} وR_{600} وهكذا، فإنّ إضافة جميع هذه العمليات إلى قائمتنا سوف تجعلنا لا نركّز بالفعل على **التناظرات الذاتية (داخلية المنشأ)** للمثلّث. بدلاً من ذلك سنكون قد ركّزنا على **المسار** الذي سلكناه عند إنجاز عملية التناظر. على سبيل المثال، يمكننا إنجاز العملية R_{240} عبر رفع المثلّث التجريبي إلى الأعلى ثم إعادة وضعه في الأسفل بعد تدويره بمقدار 240 درجة بالطريقة الطبيعية لنحصل على الرؤوس BCA؛ ولكننا يمكن أن نجري العملية عبر أخذنا للمثلث التجريبي ثم الذهاب للخارج والركض عشر مرّات حول شجرةٍ في فناء منزلنا الخلفي ثم العودة للمنزل وتناول دوناتس وأخيراً إعادة المثلث للأسفل ولكن بترتيب BCA للرؤوس. هل هذه عملية تناظر مماثلة للسابقة أم لا؟ من الواضح أننا لم نضف شيئاً إلى محتوى تحليل التناظر الذي للمثلث متساوي الأضلاع عبر إدخالنا لجميع ذلك العَدْوِ حول الشجرة في الفناء الخلفي ضمن المسار المسلوك عند إجراء العملية، فتناظر المثلث لا يتعلّق بعدد المرّات التي نركضها حول الشجرة وما إذا كان سبع مرّات أم عشر، ولا بحقيقة تناولنا لسندويشة لحم خنزير أم دوناتس. في الواقع يصعب علينا

تقفّي الأثر ومعرفةُ ما إذا كنّا قد أجرينا دوراناً R_{240} أم R_{-480} أم أيّ R_X - حيث $X = 240^o + 360^o N$ و N عدد صحيح موجب أو سالب - بعد الركض في الفناء، فالمسار الذي سلكناه لا أهمية له، ووحدهما الوضع الابتدائي والنهائي للمثلّث هما ما يحدّد العملية التي أجريناها[1].

ولذلك يجب علينا أن نعتبر أنه لدينا عملية تناظر وحيدة تمثّل أياً من الدورانات الآتية:

$$R_{240} = R_{-120} = R_{480} = R_x \text{ ، } \textbf{حيث } X = 240^o + 360^o N$$

التي تنقل وضعَ الرؤوس ABC إلى الوضع BCA. هذا هو جوهر «قابلية التمييز الأعظمية» الممكنة لعمليات التناظر، ولذلك سنرمز إلى عملية التناظر الوحيدة هذه برمز R_{240}.

---

(1) هناك فروعٌ أخرى في الرياضيات مثل **الهوموتوبية** (أو **التشوّه المستمرّ**) تهتمّ بالطرق التي يمكننا سلوكُها فوق سطوحٍ مختلفة أو في فضاءات مختلفة، وكم من المرّات نلفّ فيها حول عوائق مثل الثقوب أو غيرها، وتُعَدّ الهوموتوبيّة فرعاً من الطوبولوجيا. على سبيل المثال لنأخذ جميع المنحنيات المغلقة التي تبتدئ من نقطة P وتعود إليها فوق سطح كرة. نعتبر أنّ جميعَ المنحنيات التي يمكنها أن **تتشوّه بشكلٍ مستمرّ** لتتحوّل في ما بينها (شريطة عدم تحطيم أو قطع المنحني) مكافئةٍ لبعضها البعض. وهكذا نرى أنّ جميع المنحنيات المارّة في P متكافئة فوق الكرة، لأنه يمكن لأيّ منحنٍ أن يتشوّه ويتعدّل ليصير أيَّ منحنٍ آخر. بالمقابل لنفترض الآن أننا فوق سطح كعكة محلاّة، عندها تكون المنحنيات التي تلتفّ N مرّة حول الكعكة - كالتفاف الشرائط الجانبية البيضاء حول عجلة السيّارة سوداء اللون - **غير متكافئة** مع المنحنيات التي تلتفّ M مرّة عندما $N \neq M$ بدورها تكون المنحنيات التي تلتفّ Q مرّة حول الكعكة -مثل «أشعّة» الدولاب «نصف القطرية» - **غير متكافئة** مع المنحنيات التي تلتفّ L مرّة عندما $L \neq Q$. وهكذا تتميّز جميع المنحنيات على الكعكة بزوجٍ من **أعداد الالتفافات** (N,Q) يحدد عدد المرّات التي تلتفّ فيها هذه المنحنيات في اتّجاه الشرائط الجانبية البيضاء وفي الاتّجاه نصف القطري. ونقول بتعبير لغوي جميل إنّ **الزمرة الهوموتوبية** للكعكة هي $Z \otimes Z$، أي **الجداء الديكارتي** لمجموعة الأعداد الصحيحة بنفسها. إنّ الزمرة الهوموتوبيّة للكرة **تافهة** فهي المجموعة التي تحتوي على عنصر وحيد هو العنصر الحيادي.

ماذا عن الدوران بزاوية 360 درجة (أو 2d راديان)؟ أولاً نلاحظ أنّ هذا الدوران يُعيد المثلّث من الوضع الابتدائي ABC إليه نفسه. في الواقع يمثّل هذا الدوران عمليةَ تناظرٍ لأنها قابلةٌ للتمييز عن العمليّتَين الأُخريين اللتين أخذناهما بعين الاعتبار حتى الآن، وهي عملية خاصّة جداً في حدّ ذاتها، لأنها مكافئة لعملِ **لا شيءَ على الإطلاق**؛ وبالتالي سندعوها بـ**عملية فِعل اللاّ شيء** أو **العملية الحيادية**، وسنرمز لها بالعدد 1. ثانياً نلاحظ أنّ العنصر الحيادي هو عملية تناظر بالنسبة إلى أيّ كائن، فحتى وحيدات الخليّة الأميبيّة أو كومة الصخور تمتلك هذا العنصر الحيادي كعملية تناظر. أخيراً نلاحظ أنه كان بإمكاننا سلوك أيّ مسارٍ نريده، وبالتالي ليس بالإمكان التمييز بين دورانٍ بزاوية 360^o وبين دورانات بزاوية 360^o x N حيث N عدد صحيح موجب أو سالب، فجميعها مكافئة للعملية الحيادية.

لقد اكتشفنا حتى الآن ثلاث عمليات تناظر قابلة للتميز للمثلث متساوي الأضلاع. هل هناك عمليات أخرى؟ نعيد المثلث مرة أخرى إلى الوضع الابتدائي ABC، ولنتناول الآن **انعكاساً** عبر محورٍ من المحاور الثلاثة للمثلث المرجعي. ننفّذ هذا الأمر بأن نبدأ من الوضع الابتدائي ABC ثم نتخيّل أننا نقوم بـ «شواء» المثلث التجريبي بـ «السّيخ» (كما لو كان لدينا سيخُ شِواء، وكان مثلّثنا قطعةً كبيرة من لحم البقر) على طول أحد محاور تناظره. على سبيل المثال، إذا تمّ الشواء بموازاة المحور I ثمّ أخذنا المثلّث وقلبناه ثم وضعناه فوق المثلث المرجعي الثابت، فإننا سنحصل على الوضع الجديد ACB. ندعو هذه العملية التناظرية بالانعكاس عبر المحور I، وسنسمّيها اسماً رمزياً أيضاً هو R_I. وبشكل مماثل نعود الآن إلى الوضع الابتدائي، ونأخذ بعين الاعتبار الانعكاسَين الآخرَين: الانعكاس عبر

المحور II الذي ندعوه بالعملية R_{II} ويؤدّي إلى الوضع BAC، ثم الانعكاس عبر المحور III الذي يقود إلى الوضع CBA ورمزه R_{III}.

لدينا عند هذا الحدّ القائمةُ التالية لعمليات التناظر:

I	«لا تفعل شيئاً»، أو «الحيادي»	ABC
R_{120}	دوران بـ 120^o، أو $2\pi/3$ راديان	CAB
R_{240}	دوران بـ 240^o، أو $4\pi/3$ راديان	BCA
R_I	انعكاس عبر المحور I	ACB
R_{II}	انعكاس عبر المحور II	BAC
R_{III}	انعكاس عبر المحور III	CBA

هل هناك عمليات تناظر أخرى؟ نميّز هنا أننا اكتشفنا بشكلٍ رئيسي التبديلات الستّة بين كائنات ثلاثة: $6=3!$، أي التبديلات الستة لرؤوس المثلّث الثلاثة. بما أنّ الرؤوس يجب أن تعود ويقع بعضها فوق بعض عند إجراء عملية تناظر، فإنّ كلّ عملية تناظر هي بدورها تبديل بين الرؤوس. من الواضح إذاً أنه لا يمكن وجود أكثر من التبديلات الستة التي وجدناها، ونستنتج أنّ ما وجدناه هو فعلاً جميع عمليات التناظر الأساسية. ومع ذلك يُلقي هذا الأمرُ السؤالَ المهمّ الآتي:

سؤال: هل تُعطى تناظراتُ الأشكال المشابهة - مثل المربّعات ومتعدّدات الأضلاع والمسدّسات والمكعّبات... إلخ - كلُّها عبر تبديلات مجموعة رؤوسها؟

جواب: لا!

بينما تكون جميعُ العمليات التناظرية تبديلاتٍ للرؤوس فالعكس غير صحيح، أي لا تكون جميعُ تبديلات الرؤوس عملياتٍ تناظرية.

يمكننا أن نرى ذلك في حالة مربّع مثالي. لنفترض أنه لدينا مربّع نرمز إلى رؤوسه بالأحرف ABCD. هناك عملية تناظر صالحة نمطية للمربّع تتمثّل بتدوير المربّع 90 درجة، فتضع الرؤوسَ في الوضع الجديد DABC الذي يوافق بالفعل تبديلاً للرؤوس. مع ذلك نسأل: «هل هناك عملية تناظر تعطي الترتيب BACD للرؤوس؟» فكّر بدلالة «مربّع تجريبي» موافقٍ مثلاً لصحيفة ورقٍ مربّعة، وتخيّل أننا نريد الحصول على BACD انطلاقاً من ABCD. علينا هنا أن **نفتل** المربّع التجريبي لنبادل الرأس A بالرأس B من دون فعل شيءٍ للرأسَين C وD للحصول على الترتيب المطلوب؛ ولكن عندها لا يمكن وضع أضلاع المربّع التجريبي فوق أضلاع المربّع المرجعي بصورةٍ صحيحة. بسبب عدم توضّع الأضلاع بعضها فوق بعض كما ينبغي، لا يمكن اعتبارُ هذا التبديل عمليةً تناظرية لمجمل المربّع. توجد من أجل المربّع ثماني عمليات تناظرية لا غير، ويأتي هذا العدد من 4!/3 حيث قسّمنا العدد الإجمالي لتبديلات الرؤوس على 3، لأنّ هناك ثلاثة أنواع من عمليات الفتل (عدم فعل أيّ شيء، فتل أفقي وفتل شاقولي). وهكذا بينما تكون جميعُ العمليات التناظرية تبديلاتٍ حقاً، فإنه ليست جميعُ التبديلات عملياتٍ تناظرية. تُعتبر حالة المثلث متساوي الأضلاع من أبسط الحالات، لأنه يحتوي على ست عمليات تناظرية لا غير ـ أوردناها أعلاه ـ تكافئ (**تُشاكِل**) التبديلات بين ثلاثة أشياء.

خلاصة القول إننا وجدنا من خلال قليلٍ من التجريب (أو اللَعِب) أنّ هناك **ستّ طرق مختلفة** يمكن لنا بها إعادة وضع المثلث العلوي فوق المثلث السفلي. تمثّل هذه الأوضاع الستة المختلفة لمثلث متساوي الأضلاع فوق آخر **العملياتِ التناظريةَ** الستّ للمثلث متساوي الأضلاع، وهي **عمليات تحويل** أو **تحويلات** بمعنى أنه يمكننا الابتداء من وضعٍ ما لمثلّثين بعضهما فوق بعض، ثم **نؤثّر**

على المنظومة وفق العملية المعنية، فنرفع المثلث العلوي ونعيده فوق المثلث السفلي تماماً ولكن بوضع مختلف. في الحالة العامة يمكن أن نتساءل: «كيف نستطيع التأكّد من أنّ قائمتنا عن العمليات التناظرية لكائن ما كاملةٌ؟» قد يكون إحصاء عدد العمليات مهمةً صعبة، فهل من طريقة أخرى؟

كانت تجربتنا السابقة بديهية نوعاً ما، ولكننا الآن سنقوم بطرح ملاحظة عميقة، إذ نسأل: «هل يمكن الحصول على عمليات تناظرٍ إضافية عبر **تركيبِ** عمليّتَين **معاً** من العمليات التي وجدناها سابقاً؟» يعني ذلك أن نختار أيَّ عمليّتَين من عمليّاتنا الستّ، ولنقل مثلاً R_{120} وR_{II}. نطبّق أولاً R_{120} على المثلّث التجريبي، ثم نجري مباشرةً - من **دون إعادة المثلّث إلى وضعه الابتدائي** - العمليةَ الثانية R_{II}. نرى أنه إذا بدأنا بالوضع الابتدائي وطبّقنا R_{120} فإن ذلك سيقودنا إلى الوضع CAB؛ ثم إذا أتبعنا ذلك حالاً بالتأثير بـ R_{II} فإننا سنحصل على الوضع ACB. ولكنّ الترتيب ACB لا يمثّل وضعاً جديداً للمثلّث، إذ نجد من قائمتنا أعلاه أنه يوافق العملية R_I. لقد اكتشفنا إذاً نتيجةً لافتةً للنظر، وهي أنّ تطبيقَ R_{II} بشكلٍ يلي تطبيقَ R_{120} يعطينا نتيجة تطبيق R_I. نكتب معادلةً للتعبير عن هذا الأمر:

$$R_{120} \times R_{II} = R_I$$

أدخلنا هنا رمز الجداء × الذي يمثّل أثر تطبيق العمليّتَين التناظريّتَين بالترتيب المذكور(*) من دون العودة إلى الوضع الابتدائي

(*) يعاكس الترتيبُ المذكور في النص - والذي يوافق تطبيقَ العمليّتَين من اليسار إلى اليمين - الترتيبَ المُعتمَد في الرياضيات عند تعريف تركيب التطبيقات حيث يُستخدم الرمز o ويُعبَّر عن التركيب المذكور بـ $R_{II} \, o \, R_{120} = R_I$ وهنا يكون ترتيبُ إجراء العمليات من اليمين إلى اليسار.

بعد إجراء العمليّة الأولى. من السهل رؤية أنّ تركيبَ أيّ عنصرَي زوجٍ من العمليات التناظرية عبر عملية الجداء يُنتِج عمليةً تناظرية أخرى. نقول إذاً إنّ مجموعتنا التي تتألّف عناصرها من العمليات التناظرية هي مجموعةٌ **مغلقةٌ** بالنسبة إلى عملية الجداء، وبالتالي يشبه تركيبُ عمليّتَين تناظريّتَين لإعطاء عملية تناظرية جديدة جداءَ الأعداد، وضمن هذا المعنى تكون العملية الموافقة لـ «عمل لاشيء» هي العنصر الحيادي فعلاً لأنه لدينا: $1xX = Xx1 = X$.

يطلق الرياضياتيون تسميةً خاصّةً على مجموعة العمليات التناظرية المجرّدة للمثلّث متساوي الأضلاع هذه فتُدعى **بزمرة التناظر** للمثلث متساوي الأضلاع، ويُرمَز لها بـ S_3.

وبشكلٍ أعمّ يُعرَّف أيّ تناظر من خلال مجموعة من العمليات التناظرية تشكّل زمرةَ تناظر. إنّ الخصائص المجرَّدة لزمرة التناظر هي ما لفتت حالاً انتباهَ الرياضياتيين الذين يقومون بحلّ مسائلَ في الهندسة وفي الطوبولوجيا من خلال تحويلها إلى **مسائل جبرية مكافئة**. نستطيع الآن السؤال عمّا إذا كانت هذه العمليات التناظرية المجرّدة تمتلك خواصّ جبرية محدّدة مثل الأعداد.

لقد رأينا للتوّ أنّ زمرة التناظر تشكّل منظومةً جبريةً متضَمَّنة ذاتياً، إذ إنّ تركيباً متتالياً لعمليتَي تناظر يولّد دوماً عمليةً تناظرية ثالثة في قائمتنا، وبالتالي عنصراً من الزمرة نفسها. يصبح هذا التركيبُ نوعاً من «الجداء أو الضرب»، فنقول إنّ زمرة التناظر مغلقة بالنسبة إلى الضرب.

نستطيع إذاً من أجل هذه المجموعة البسيطة المكوَّنة من عمليات التناظر الستّ أن ندوّن ونكتب جدول الضرب الكامل لزمرة تناظر المثلّث متساوي الأضلاع (انظر الشكل م 2).

	1	$R_{(120)}$	$R_{(240)}$	R_I	R_{II}	R_{III}
1	1	$R_{(120)}$	$R_{(240)}$	R_I	R_{II}	R_{III}
$R_{(120)}$	$R_{(120)}$	$R_{(240)}$	1	R_{III}	R_I	R_{II}
$R_{(240)}$	$R_{(240)}$	1	$R_{(120)}$	R_{II}	R_{III}	R_I
R_I	R_I	R_{II}	R_{III}	1	$R_{(120)}$	$R_{(240)}$
R_{II}	R_{II}	R_{III}	R_I	$R_{(240)}$	1	$R_{(120)}$
R_{III}	R_{III}	R_I	R_{II}	$R_{(120)}$	$R_{(240)}$	1

الشكل م 2: جدول الضرب بالنسبة إلى زمرة تناظر المثلّث متساوي الأضلاع.

يجب قراءة هذا الجدول كما لو كان خريطةً لطرق دولية (أوتوستراد)، فلحساب $R_{240}\ x\ R_{II}$ من الجدول نأخذ العمليةَ الأولى R240 كعنصر في العمود الأقصى إلى اليسار، أمّا العملية الثانية R_{II} فهي عنصرٌ في السطر الأعلى، ثم ننظر إلى النتيجة عند تقاطع العمود والسطر السابقَين في الجدول فنجد أنها R_{III}، أي لدينا $R_{240}\ x\ R_{II} = R_{III}$. وبما أنّ جداء أيّ عنصرَين من عناصر الزمرة الستّة هو دوماً عنصرٌ آخر من الزمرة، فإننا نقول إنّ الزمرة مغلقة بالنسبة إلى الضرب.

تكمن إحدى الخصائص اللافتة للنظر لأيّ زمرة تناظرية في أنّ جدول الضرب يشكّل «مربّعاً سحرياً». ونقصد بذلك في مثالنا أن أيّ عنصر من العناصر الستّة للزمرة (وهو يعني أيّ عملية تناظرية) يظهر مرّة ومرّة واحدة فقط في كلّ سطر وفي كلّ عمود من الجدول. وهذا الأمر صحيحٌ بالنسبة إلى **جميع** زمر التناظر.

نجد علاوةً على ذلك ـ وبشكل قد يثير الدهشة ـ أنّ **القانون التبديلي للجداء** (أي القانون القائل بأن 4×3 =3×4) **ليس بالضرورة صالحاً** بالنسبة إلى جميع زمر التناظر. يعني ذلك أنه بالإمكان

إيجادُ عمليّتَي تناظر A وB بحيث $A \times B$ لا يساوي $B \times A$! يمكننا رؤية ذلك من خلال مثال؛ إذ سبق لنا حساب الجداء $R_{240} \times R_{II} = R_{III}$، فلو ضربنا العنصرَين نفسَيهما ولكنْ الآن بترتيب معاكس، $R_{II} \times R_{240}$، فإنّ ذلك يعطي RI. نستنتج من ذلك أنّ الضرب هنا ليس تبديلياً.

إذاً يمكن بشكل عمومي ـ من أجل العملية المركَّبة ـ أن نحصل على نتيجةٍ مختلفة عند تطبيق العمليات التناظرية بترتيبِ معاكس. هناك بعض الزمر التي تكون عملية ضربِ عناصرها تبديليةً تماماً، وفي هذه الحالة نعطيها اسماً خاصّاً: **زمر تبديلية** (أو **آبِليّة**(*) (Abelian)). إنّ الزمر التناظرية العامّة ـ مثل زمرة تناظر المثلّث متساوي الأضلاع ـ غير تبديلية أو غير آبليّة.

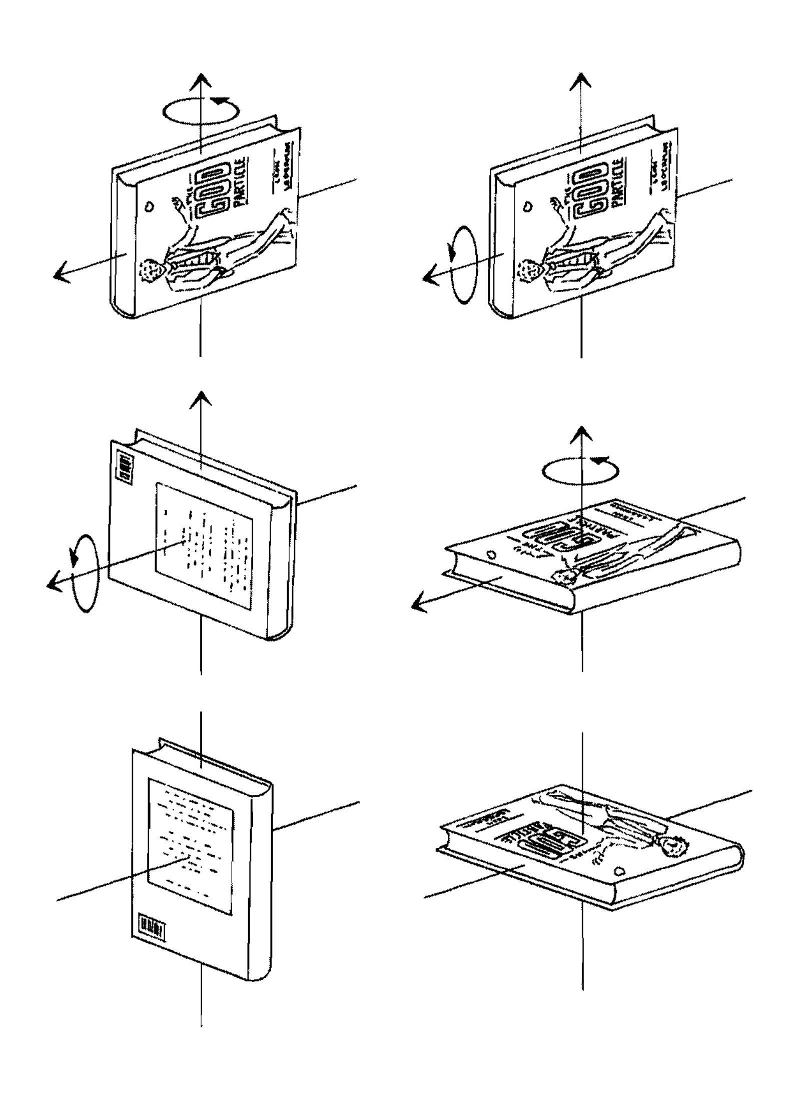
إنّ خاصّية عدم التبديليّة هي حقيقةٌ مدهشةٌ يمكن استحضارها عن التناظرات وعن الدورانات العادية وبالتالي عن الطبيعة نفسها. من الممكن بسهولة توضيح خاصّية عدم التبديل هذه من خلال كتابٍ لا على التعيين. لنأخذ نسخةً من كتابٍ ما (إنّ أيّ كتاب يصلح لذلك)، ويمكن أن يكون نسخةً من كتاب **جسيم الله**(**) (*The God Particle*) الذي كتبه أحّد مؤلّفَي هذا الكتاب (ليون ليديرمان). نستطيع تطبيق عمليات التدوير على الكتاب تماماً كتأثيرنا بها على الكرة، ولكنّ

(*) نسبةً إلى العالِم النروجي نيلز آبل (Niels Abel) الذي عاش في القرن التاسع عشر.

(**) كتاب تبسيطي ـ مليءٌ بروح الدعابة ـ عن تاريخ فيزياء الجسيمات منذ أيّام اليونانيين القدماء ولغاية العصر الحديث كتبه ليون ليديرمان وديك تيريزي (Dick Teresi)، أمّا الجسيم المقصود بالعنوان فهو جسيم هيغز ـ من حيث إنه موجود في كلّ مكان ولم نرَه لغاية اليوم ـ علماً بأنّ بيتر هيغز ذكر في أحد أقواله مازحاً بأنّ ليديرمان كان يرغب في البداية بتسمية الكتاب بـ (*The Goddamn Particle*) بسبب استعصاء كشف هذا الجسيم علينا حتى الآن.

الفرق يكمن في أنّ الكتاب ـ بخلاف الكرة ـ لن يعود كما كان مطابقاً لوضعه الابتدائي، بل سينتهي عادةً في أوضاع مختلفة، وبالتالي يمكننا هنا رؤية النتيجة الصافية لدوراناتنا (انظر الشكل م3).

نستطيع أن نتصوّر منظومة إحداثيات خياليّة مبدؤها يتوضّع عند مركز الكتاب كما في الشكل م3. ندوّر الكتاب الآن بزاوية 90 درجة حول محور x الخيالي، ويتمّ التدوير دوماً وفقاً لـ «قاعدة اليد اليمنى»، أي نشير بإبهامنا إلى الاتجاه الموجب للمحور ثم نقوم بالتدوير باتجاهٍ موافق لجهة التفاف الأصابع (بالطريقة نفسها التي ندير بها مفكّ البراغي عند تثبيت برغي)، ولندعُ هذه العملية A. لنُتْبِع الآن هذا الدورانَ بدورانٍ آخر بزاوية 90 درجة حول محور y الخيالي، ولندعُ هذا الدوران بالعملية B. ننظر الآن إلى الوضع النهائي للكتاب فيكون هو نتيجةَ تطبيق $A \times B$. لنَعُد الآن إلى الوضع الابتدائي للكتاب، وندوّره أولاً حول المحور y (العملية B)، ثم نتلو ذلك بالدوران حول المحور x (العملية A)، ولنرَ أين سينتهي الكتاب بعد تطبيق $B \times A$ وهل $A \times B$ مساوٍ لـ $B \times A$ إنّ الإجابة على ذلك هي بـ**النفي** القاطع، فالترتيب الذي نُجري وفقاً له الجداء (تركيب العمليات) مهمٌ، وخاصّية عدم التبديل هذه هي خاصيّة للدورانات وليس للجسم الذي نديره.



الشكل م 3: تدوير كتاب **جسيم الله**. إذا أجرينا الدورانات بترتيب معاكس فإنّ وضعَ الكتاب النهائي سيكون مختلفاً. إنّ الدورانات في كوننا غير تبديلية. (رسم شي فيريل).

يتضمّن عالَمنا الفيزيائي إذاً أشكالاً مجرّدة من الأعداد موافقة للعمليات التناظرية. وهذه الأعداد ليست مثل الأعداد الاعتيادية 3، 4... إلخ، فنحن عندما نضرب 3 و4 بأيّ ترتيب كان (3×4 أو 4×3) فإننا نحصل دوماً على النتيجة 12، وبالتالي يُعتبر علمُ الحساب بسيطاً ضمن هذا المعنى، إذ لا يهمّ الترتيب الذي نجري به عملية الضرب، فالضرب في الحساب تبديلي. ولكنّ الأعداد المجرّدة التي نلاقيها الآن، ومع أننا يمكن أن نضربها معاً بشكلٍ يوافق تتالياً للتأثيرِ بعملياتِ تناظرٍ على منظومة فيزيائية ما، فإنّ الترتيب الذي نجري وفقه عملية الضرب له أهميته. لقد رأينا مثالَين حتى الآن عن زمرتَين غير تبديليّتين S_3، و$SU(2)$[*].

قام الرياضياتيون خلال دراساتهم لعددٍ جمّ من التناظرات بالتوصيف المجرّد لمجموعة الخصائص الأصغرية التي تؤهّل شيئاً ما لأن يكون زمرة تناظر. تؤطّر هذه الخصائصُ جوهرَ التناظر وتضعه ضمن مجموعة من البيانات المنطقية أو الجبرية، ويمكن إيرادها كما يأتي:

1 ـ **الزمرة** هي مجموعةٌ من العناصر X_i مع قانون تركيب (قانون تشكيل داخلي) ×، بحيث يعطي جداءُ أيّ عنصرَين عنصراً من المجموعة (الإغلاق).

2 ـ يوجد عنصر وحيد حيادي 1 يحقّق $1xX = Xx1 = X$ من أجل جميع العناصر X في المجموعة.

3 ـ لكلّ عنصرٍ عنصرٌ نظير (مقلوب) وحيد. يعني ذلك أنه إذا

(*) بالأحرى زمرة الدورانات في الفراغ (3) SO «المُشاكلة» لـ (2) SU.

جبر القسمة المنظّم (Normed Division Algebra) هو جبر يكون فيه لكلّ عنصر غير الصفر مقلوب ضربي، وهو أيضاً فضاء شعاعي مزوَّد بنظيم يحقّق: $||xy|| = ||x||.||y||$ هناك أربعة أنواع فقط لجبر القسمة المنظّم على حقل الأعداد الحقيقيّة.

أُعطينا عنصراً X فإنّ هناك عنصراً وحيداً X^{-1} يحقّق $XxX^{1} = X^{1}\,x\,X$.
(لاحظ أنه يمكن لـ X وX-1 أن يكونا العنصرَ نفسه).
4 ـ قانون الضرب في الزمرة تجميعي، أي: $X\,x\,(YxZ) = (XxY)\,xZ$.

انطلاقاً من هذه التصريحات ـ أو **المسلّمات** ـ يمكن البرهان على كثير من **النظريات** عن الزمر. على سبيل المثال تنجم حقيقةُ كونِ جداول الضرب لجميعِ الزمر تؤلّف «مربّعات سحرية» عن هذه المسلّمات.

لنلاحظ أنّ مفهوم **الخاصيّة التجميعيّة** يتّسم نوعاً ما بالحذق، فهو يعني أنه إذا ما أُعطينا ثلاثة عناصر من الزمرة X وY وZ، فإننا نبدأ بمثلّثنا التجريبي وهو في الوضع الابتدائي ثمّ نؤثّر عليه بالعملية Y ونتلو ذلك بتطبيق العملية Z، فنحصل على نتيجةٍ نقوم بحفظها ونسمّيها (النتيجة W). بعد ذلك نُعيد المثلّث للوضع الابتدائي، ونطبّق عليه أولاً X ومن ثم نقوم بتطبيق W. إنّ النتيجة النهائية التي نحصل عليها من خلال تطبيق هذه المتتالية من العمليات هي نفسها التي نحصل عليها عبر تطبيق X أولاً يليه Y ثمّ Z. يبدو هذا معقّداً قليلاً، ولكنه يعبّر عن المعنى الحقيقي العمليّاتي للخاصّية التجميعية.

في الواقع نحن غالباً ما نفترض سلفاً أنّ الخاصّيةَ التجميعية صحيحةٌ، لأنّ العمليات المألوفة في الحساب تجميعية، فمثلاً $3\times(4\times5) = (3\times4)\times5$. مع ذلك توجد في الرياضيات البحتة منظوماتٌ غير تجميعية حيث $X\,x\,(YxZ)$ لا يساوي $(XxY)\,xZ$، وكمثالٍ عليها نأخذ الحالةَ التي يمثّل فيها حقيقةَ الرمزُ «×» عمليةَ **القسمة**. يعني ذلك أنه عندما نقول «3 مقسومةً على 4 مقسومةً على 5»، فإنّ علينا تحديد ما نعنيه بالضبط: أهو $(3/4)/5=0.15$ أم $3/(4/5)=3.75$؟ إذاً القسمة (عندما يُنظر لها كـضربِ **بمقلوبِ** العدد

المقسوم عليه) ليست تجميعية. وكملاحظة جانبية هناك أشياء مبنية على هذه الفكرة ـ أكثر صعوبةً على الفهم حتى من ذلك ـ تُدعى بـ **جبور القسمة المنظَّمة**، وهي تقود إلى أنواعٍ غريبة من الأعداد تُدعى بـ **الثُمانيات**(*) (Octonions). حاول بعضُ النظريّين ربطَ الرياضيات غير التجميعية بالفيزياء، وفي منتصف السبعينيات كانت هناك دراساتٌ حول علاقةٍ محتملة للثُّمانيات بفيزياء الكواركات، ولكنّ هذه الأفكار لم تقُد إلى شيءٍ ملموس. يبدو أنّ الخاصّية غير التجميعية ليست مهمةً جداً في وصف طبيعتنا، ويمكن القول إذاً ـ في حدود معرفتنا الحاليّة ـ إنّ الطبيعة تجميعية دوماً، فالتناظرات مهمّة للطبيعة، وزمر التناظر **دوماً** تجميعية.

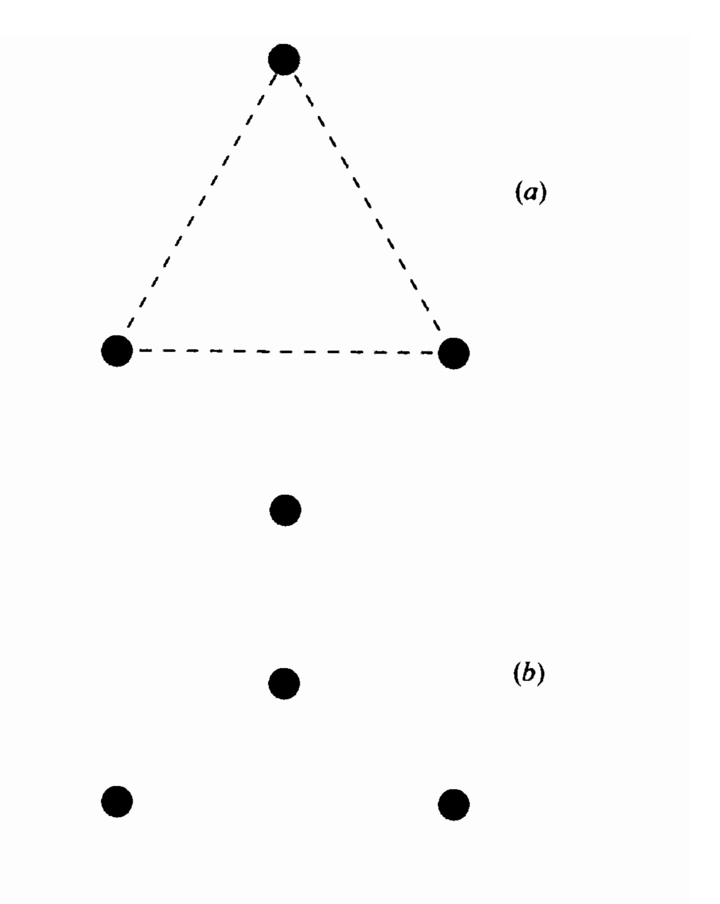
من خلال اعتبارِ المسلَّماتِ سالفةِ الذكر للزمر ميّزاتٍ تعريفيةً لكلِّ التناظرات أمكن للرياضياتيين أن يقوموا بتصنيف جميع التناظرات الممكن تواجدها. لقد مثّل تصنيفُ التناظرات المتقطّعة ولوقتٍ طويل مسألةً بالغة الصعوبة، ولم يكتمل حلّها إلاّ في العقود القليلة الأخيرة[2]، مع العلم أنه توجد بعض التناظرات المتقطّعة المُرعبة التي لا تُصادَف إلاّ في العالَم التجريدي. على سبيل المثال هناك بعض الشبكات البلّورية ـ التي يمكن أن نتصوّر وجودَها في أيّ عددٍ من الأبعاد للفضاء المجرّد ـ تُعرَّف من خلال **التوضيب (التكويم) الأكثر تراصّاً للكرات** في تلك الأبعاد. يستطيع المرء أن يتخيّل صندوقاً بحجمٍ لامتناهٍ في الكبر مملوءاً بكريّات يمكن أن

(*) تعميمٌ غير تجميعي للأعداد فوق العقدية الرُّباعيات (Quaternions) تمّ اكتشافه في القرن التاسع عشر، ويمكن النظر لأي ثُماني كتركيب خطّي حقيقي من ثمانية ثُمانيّات واحديّة تتبع قواعدَ خاصّة في ضربها.

(2) Daniel Gorenstein, «The Enormous Theorem,» *Scientific American*, vol. 253, no. 6 (December 1985), p. 14.

تحمل بعضها بعضاً، فإذا هززنا الصندوق بشكلٍ كافٍ فإنّ الكريّات المذكورة سوف تأخذ وضعاً يماثل شبكة بلورية منتظمة، ويمكننا التساؤل هنا عن الشبكات المختلفة التي يمكن لمثل تلك الكريّات أن تشكِّلها في ثلاثة أبعاد أو في أربعة أبعاد أو في أيّ عدد كان من الأبعاد. تمثّل **زمرُ الشبكات** هذه زمرَ تناظر متقطّع بعددٍ كبير جداً من العمليات التناظرية. هناك علاقةٌ وثيقة بين الشبكات الموجودة في أبعاد مختلفة وبين التناظرات التي تتمتّع بها في هذه الأبعاد، وبشكلٍ لافت للنظر هناك نوعٌ خاصّ من الشبكات يظهر عندما يكون عدد الأبعاد مساوياً لستة وعشرين بعداً بينما لا يتبدّى عند عددِ أبعاد أقلّ. يمثّل هذا النوع **تناظراً استثنائياً** ويُدعى بـ**الزمرة الوحشية**، وهي تحتوي على 8×10^{53} عملية تناظر.

تسبّبُ عمليةُ إيجاد تناظرات استثنائية ـ مثل الزمرة الوحشية ـ الصداعَ لمن يحاول تصنيف جميع التناظرات المتقطّعة الممكنة. يتطلّب حلُّ مسألةِ إيجادِ جميعِ التناظراتِ الممكنةِ استخدامَ الحواسيب من أجل إثبات النظريات فائقة التعقيد عن تصنيف التناظرات المتقطّعة. يُقال إنه ليس بإمكان عقلٍ بشري واحد الإلمامُ بكامل أمثال هذا النوع من البراهين. وفي الواقع يثير هذا الأمر القلقَ، مع العلم أنه يوجد اليوم فرعٌ كامل من الرياضيات يستعمل الحاسوبَ من أجل محاولة البرهان على صحة نظريات معقّدة. تجعل هذه الظاهرة الجديدة ـ أي إثباتُ النظريات الرياضياتية باستخدام الحاسوب ـ كثيراً من الناس لا يشعرون بالراحة، وذلك لأسبابٍ عديدة ومتنوّعة. إذ كيف يمكننا ـ حتى من حيث المبدأ ـ معرفةُ أنّ الحاسوب لم يخطئ؟ وهل سيكون بإمكان الحاسوب في نهاية المطاف فهمُ العالَم المجرَّد بشكلٍ أفضل منّا نحن البشر؟ ولو كان هذا هو الحالُ فهل نمثّل نحن محطةً نهائية في متتالية تطوّر الكائنات الحيّة؟



الشكل م 4: مسألة امتحان الـ SAT التي واجهت شيرمان: (a) ثلاث كتلٍ متساوية مرتّبة بشكل متناظر، (b) كتلة رابعة متوضّعة في المركز. ما هي القوة المؤثّرة على الكتلة الموجودة في المركز؟ (رسم CTH).

لحسن الحظ يمكن إجراء التمرين الذي فعلناه في حالة المثلث متساوي الأضلاع على أيّ شكلٍ هندسي بسيط، ويمكنك ـ إذا أردتَ ـ محاولتَه في حالة المربّع. ما هو عدد العمليات التناظرية للمربّع؟ (الجواب: ثماني عمليات، كما رأينا أعلاه). أورِدْ جميعَ

هذه العمليات، وحاولْ إيجادَ جدول الضرب الموافق لها. حاولْ بعدها تكرارَ العمل نفسه بالنسبة إلى المكعّب (وهو تعميمٌ ثلاثي الأبعاد للمربّع)، ثم بالنسبة إلى المكعّب الفائق (تعميم المكعّب في فضاءٍ مهما كان عدد أبعاده). لكلٍّ من هذه الأشكال الهندسية مجموعةٌ خاصّةٌ من عمليات التناظر توافق زمرةَ تناظر الشكل نفسه.

مسألة بسيطة في امتحان التقييم المدرسي لشيرمان

دعونا الآن نبيّن كيف يؤدي التناظر دورَه في مسألة فيزيائية. لنفترض أنّ جارنا الودود ـ طالب الثانوية شيرمان ـ واجه مسألةً فيزيائية في امتحان التقييم (SAT)(*) . يرغب شيرمان بالطبع في الحصول على علامةٍ عاليةٍ في الفحص بحيث يستطيع الالتحاقَ بجامعة مكلفة ودراسةَ المحاماة في نهاية المطاف. إنه منفعلٌ وعصبي المزاج في ما يتعلّق بأسئلة الرياضيات والفيزياء. من اللافت للنظر أنه لفهم هذه المسألة الفيزيائية ومتابعة شيرمان في خطواته، فإننا لا نحتاج إلى معرفة الكثير عن الفيزياء أو الرياضيات، ولا يتوجّب علينا استعمال كثير من المعادلات. ومع ذلك سوف تتكوّن لدينا فكرةٌ عن كيفية عمل منظوماتٍ فيزيائية في الواقع الفعلي وبالتفصيل، وسيتبيَّن لنا كيف أنّ التناظر يتحكَّم بها.

هناك ثلاث كتل متساوية متموضّعة بشكل مثلّث متساوي الأضلاع، وهناك كتلة رابعة في مركز المثلّث (انظر الشكل م 4). ما هي القوة الثقالية التي تؤثّر بها الكتل الثلاث المرتّبة بشكل مثلّث على الكتلة في المركز؟

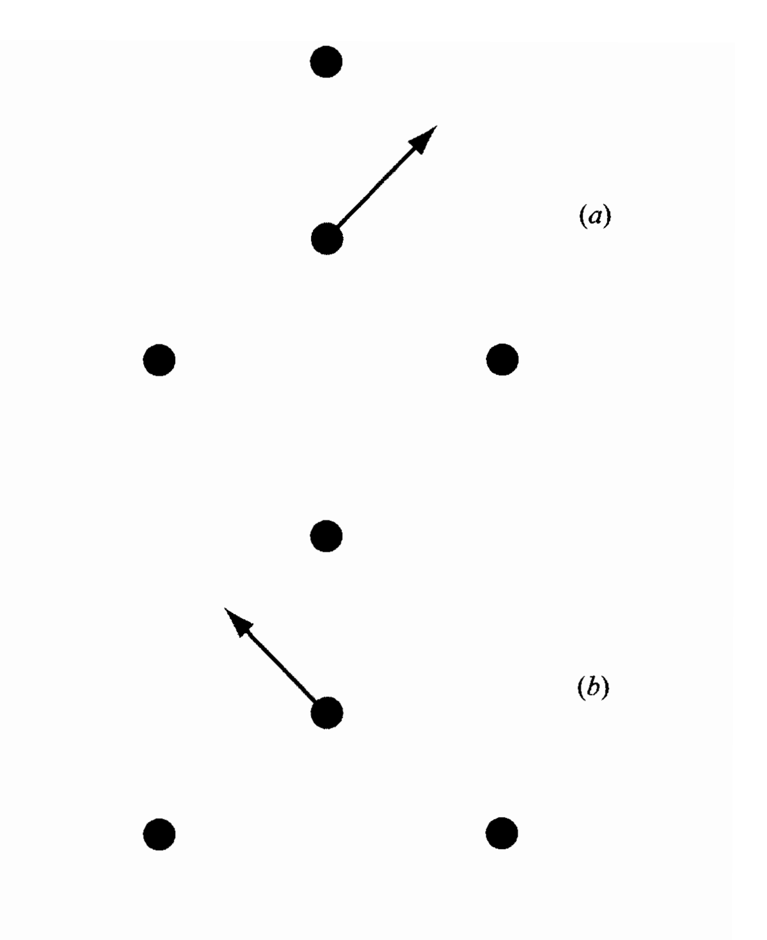
(*) (Scholastic Assessment Test): امتحان معياري لطلاّب الثانوية للقبول في كثيرٍ من جامعات الولايات المتحدّة.

في a من الشكل م 4 لدينا ثلاثة كائنات ثقيلة متموضعة بشكل مثلّث متساوي الأضلاع (وهذا الأمر يجب أن يكون قد أصبح مألوفاً بالنسبة إليك). يعني ذلك أننا وضعنا عند كلّ رأسٍ من رؤوس المثلّث الخيالي واحداً من الكائنات التي يجب أن نعتبرها ساكنة (يمكنك تصوّر هذا عبر التفكير بها وكأنه قد تمّ تجميدها أو لصقها بالغراء لتثبت في مكانها). يمكن لهذه الكائنات أن تكون أيّ شيءٍ نريده (كرات بلياردو أو كواكب أو ثقوب سوداء أو ذرّات أو كواركات ثقيلة جداً أو . . .)، فما يهمّنا فقط هو أن تكون هذه الأشياء كرويةً بشكلٍ مثالي تقريباً ـ أو أن تكون نقاطاً مادّيّة ـ لا بنية داخلية أو مخفية (لا يمكننا رؤيتها) لها ممّا يمكن أن يُفسد التناظر المثلّثي لمنظومتنا. على سبيل المثال لا نريد لكائناتنا هذه أن تكون مغانط بأقطاب شمالية وجنوبية غير مرئية تشير إلى اتّجاهات عشوائية (تُثبت التحليلات أنّ للكواركات الثقيلة مثل الكوارك الذروي مغنطةً ضئيلةً جداً، ويعود سبب ذلك إلى أمرٍ يُدعى **تناظر الكوارك الثقيل**). ولا نرغب كذلك بأن تكون كائناتُنا متحرّكة، ويمكن ـ في حالة حركتها ـ أن نعتبر أننا قد لمحناها تلقائياً في اللحظة التي كانت فيها متموضعة عند رؤوس المثلّث. إذاً من أجل المنظومة الخاصّة للكتل الثلاث التي اعتبرناها فإنّ تناظرات المثلّث متساوي الأضلاع المألوفة لنا ـ والتي ناقشناها سابقاً ـ هي تماماً نفس التناظرات التي تتمتّع بها منظومتنا الفيزيائية، ومن ثم نقول إنّ منظومتنا تمتلك تناظر المثلّث متساوي الأضلاع S_3.

في b من الشكل م 4 وضعنا كائناً رابعاً في مركز التشكيل المثلّثي لهذه الكائنات. ومرةً أخرى يمكن لهذا الكائن أن يكون أيّ شيءٍ لكنْ من دون أيّ خواصّ داخليّة ذات صفة يمكن أن تُفسد أو تُلغي التناظر، لذلك رغم وجود الكائن الرابع في المركز فإنّ لدينا أيضاً تناظراً تامّاً لمثلّث متساوي الأضلاع.

إليك الآن المسألة الفيزيائية التي يجب على شيرمان حلّها: **ما هي القوة الثقالية التي يشعر بها الكائن الموجود في المركز والناتجة عن الكائنات الثلاثة المتموضعة في رؤوس المثلّث؟** تأمّل قليلاً في هذه المسألة وحاول إيجاد الجواب عليها بنفسك. تذكّر أنّ القوة مقدار له طويلة (سعة) ـ أي شدّة ـ واتّجاه في المكان، وبالتالي فالقوة ـ كأيّ شيءٍ له طويلة واتّجاه ـ هي **شعاع**. نرمز عادة للشعاع بسهم صغير يبيّن الاتّجاه الذي يشير إليه، كما يدلّ طول السهم على طويلَة (سعة) الشعاع. في الحقيقة إنّ مسألتنا الحاليّة مسألةٌ بسيطةٌ جداً، وجدير بالملاحظة قبل ذكر الجواب أنه إذا كانت طويلة الشعاع صفراً كان الشعاع نفسه صفراً، فإذا كنتَ تخمّن أنّ الجواب على مسألة وظيفة شيرمان هو الصفر فإنك تكون قد أصبتَ بتخمينك!

ولكنّ شيرمان يحاول أن يحلّ المسألة باستخدام الحسابات بغضّ النظر عن طول هذه الحسابات، فيستخدم رياضيات الأشعة ويحاول أن يجمع **أشعةَ القوى** التي تؤثّر بها الكتل في رؤوس المثلّث على الكتلة في المركز. إنّ هذه طريقةٌ صالحةٌ تماماً لحساب القوة الصافية المطبَّقة على الكائن في المركز. لسوء الحظّ تتضمّن هذه الطريقة عدداً كبيراً من العمليات الحسابية، ويحصل شيرمان في نهايتها على النتيجة المبيّنة في a من الشكل م 5.



الشكل م5: إجابة شيرمان الخاطئة: a، نتيجة حساب شيرمان لشعاع القوة؛ b: تعطي النتيجة في a عند انعكاسها عبر المحور I نتيجةً مختلفة. لا يمكن للحساب السابق أن يكون صحيحاً، لأنّ المنظومة قبل وبعد الانعكاس تمثّل المنظومةَ الفيزيائية نفسها.

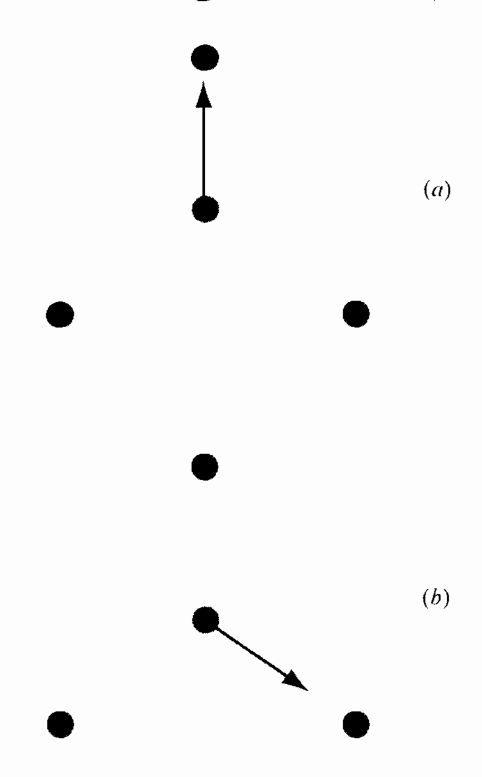
هناك طريقة سهلة للتحقّق من صحّة حلّ المسألة وذلك باستخدام التناظر. لنتناول حلّ شيرمان الموضّح في a من الشكل م5،

ولنتساءل ما إذا كان يتمتّع بالتناظر الذي تمتلكه المنظومة؟ لنتذكّر أنه إذا قلبنا (عكسنا) المثلّث حول محور التناظر I فإننا نحصل من جديد على نفس المسألة الفيزيائية. ولكننا إذا قلبنا حلّ شيرمان حول المحور I فإننا نحصل على النتيجة المبيَّنة في b، وهي تمثّل جواباً مختلفاً عن القوة التي تختبرها الكتلة في المركز. ولكنّ المسألة الفيزيائية يجب أن تبقى نفسها في جميع النواحي، ومن ثم على **الجواب أن يبقى نفسَه!** إذاً لابدّ أنّ شيرمان قد أخطأ في إجابته.

عندما يسمع شيرمان خبَرَ أنّ إجابتَه كانت خاطئة، يعود ويراجع بسرعة حساباته فيجد أنه ارتكب بالفعل خطأً. لقد فاته أن ينتبه لإشارة «ناقص» في إحدى معادلاته، فقام بجمع مركّبتَين سينيّتَين (على المحور x) لأشعّته بعضهما إلى بعض، بينما كان يتوجّب عليه طرحهما بعضهما من بعض. وبتصحيح هذا الخطأ يحصل شيرمان على النتيجة المبيَّنة في الشكل م 6، حيث يقع شعاع القوة الآن على محور التناظر I، وبالتالي إذا قلبنا المثلّث حول المحور I فسنحصل على الجواب نفسه. وهكذا تجتاز الإجابةُ بنجاح الاختبارَ التحقّقي الذي وضعناه، وبالتالي يمكن أن تكون هذه الإجابة صحيحة.

ولكنّ تناظر المثلّث متساوي الأضلاع هو مجموعةٌ من التحويلات أكبر من مجرّد القلب حول المحور I، فعلى سبيل المثال يمكننا أن ندوّر المثلّث بزاوية 120 درجة محافظين على المركز ثابتاً في المكان. ومرةً أخرى نجد أنه إذا دوّرنا إجابةَ شيرمان، فإنها سوف تتغيّر معطيةً النتيجة الجديدة المبيَّنة في b من الشكل م 6. وبالتالي هذه الإجابة بدورها لا يمكن أن تكون صحيحة، لأنّ نفس المنظومة الفيزيائية يجب أن تعطي نفس النتيجة قبل أن نطبّق عليها أيّ عمليةٍ تناظرية وبعد هذا التطبيق! يعود شيرمان عند سماعه هذه الأخبار إلى مقعده، ويعيد حساباته ليكتشفَ خطأً آخر ارتكبه فيقوم بتصحيحه. ها هو هنا قد حصل أخيراً على الجواب الصحيح: صفر!

يجب أن يكون الجواب الممثّل للقوة المؤثّرة على الكتلة الموجودة في المركز مساوياً للصفر اعتماداً على تناظر المثلّث متساوي الأضلاع. في الواقع يمكن أن تكون قد خمّنتَ ذلك منذ البداية، فتناظر المثلّث متساوي الأضلاع يحكم فيزياءَ هذا المثال البسيط، ويُلزم بطريقة أساسية النتائجَ أن تأخذ قيمَها التي هي عليها.



الشكل م6: تصحيح شيرمان: a. نتيجة شيرمان الممثّلة لشعاع القوة بعد تصحيح إجابته بحيث تنعكس بشكلٍ صحيح وفق المحور I؛ b: رغم التصحيح الموضّح في a، فإنّ الإجابة تتغيَّر عند الدوران بزاوية 120 درجة، ومن ثم لابدّ أن تكون هذه الإجابة أيضاً خاطئة. الإجابة الصحيحة الوحيدة الممكنة لشعاع القوة هي F $= 0$!

والآن إليك هذه الحقيقةُ المدهشة: افترض أنّ القوة التي طلبنا حسابها ليست قوة ثقالية بل شيئاً آخر. على سبيل المثال يمكن للقوة أن تكون قوةَ الجذب الكهربائي بين الشحنات الكهربائية، أو أن تكون القوةَ النووية الشديدة بين البروتونات والنترونات والتي تؤدي لتماسكِها معاً ضمن النواة في ذرّة ما، أو أن تكون القوةَ التي تسبّب اتّحاد الكواركات بعضها مع بعض لتشكيل الجسيمات المكوِّنة للنوى، ويمكن كذلك أن تكون القوى الثقالية بين أربعة ثقوب سوداء في تشكيلة مثلث متساوي الأضلاع. طالما كان تناظر المثلّث متساوي الأضلاع هو التناظر الذي تمتلكه المنظومة الفيزيائية في مثالنا، فإنّ القوة في المركز يجب أن تكون معدومة مهما كان الشيء الذي يولّدها. إنّ التناظر هو ما يجعل ذلك يحصل، وليس التفاصيل الخاصّة بالثقالة أو بالكهرمغناطيسية أو بالكروموديناميك الكمومي. يمكن للجسيمات الثلاثة المتموضعة عند الرؤوس أن تكون ثقوباً سوداء أو أحاديات قطب مغناطيسية، ومع ذلك سوف تظل النتيجة نفسها: الصفر!

كانت المسألة في امتحان الـ SAT الثاني لشيرمان هي التالية: **ما هي القوة الثقالية المؤثّرة على كائنٍ موجود في مركز كوكبٍ أجوف يتمتّع بالتناظر التامّ لكرة؟** لم يحاول شيرمان ـ حتى مجرّد المحاولة ـ إيجادَ ذلك عبر إجراء الحسابات، فقد أصبح الأمر واضحاً بالنسبة إليه الآن في أنّ التناظر مرة أخرى هو الذي يحدّد ما يجب أن تكون عليه القوة. لقد تعلّم شيرمان درسَه جيداً: إنّ التناظر هو الملك!

الزمر التناظرية المستمرّة

تتمتّع الدائرة بقدرٍ وافر من التناظر، بل للدائرة في الحقيقة ـ كما سنرى ـ مقدار لا محدود من التناظرات مقارنةً مع المثلّث متساوي الأضلاع. لنفترض أننا رسمنا زوجاً مكوَّناً من دائرتَين

بقطرَين متساويَين على زوج من اللويحات البلاستيكية الشفّافة أو على ورقتَين شفّافتَين تقريباً. يمكّننا أن نتخيّلَ دائرتَينا مثبّتتَين بعضهما فوق بعض عند مركزَيهما، وحينئذٍ يمكننا تغييرُ موضعِ الدائرة العلوية عبر تدويرها بلطفٍ مع ثبات مركزها، ويمكننا إجراء هذا التدوير بزاويةٍ كيفيّة أيّاً كانت قيمتها من الدرجات. هناك إذاً عدد لانهائي من الدورانات موافقٌ لأيّ عدد محصور بين 0 و360 درجة. ما يأسر اللبّ بصورة خاصّة هنا هو قدرتنا على تدوير الدائرة العلوية بمقدارٍ صغير جداً ـ أو **لامتناهٍ في الصغر** ـ مع إبقائنا لها متموضعة فوق الدائرة السفلية، ومن هنا يكون لدينا عدد لانهائي من الطرق التي يمكن بها لدائرة أن تتوضّع فوق دائرة أخرى. في حالة المثلّث متساوي الأضلاع كانت هناك فقط ستٌّ من مثل هذه الطرق، وتوجّب علينا عند تغيير موضع المثلّث العلوي أن نرفعَه ثمّ نحرّكه من خلال خطوةٍ محدّدة؛ كأن نقلبه أو نديره بمقدارٍ زاويّ متقطّع تبلغ قيمته الأصغرية 120 درجة. لا يوجد تناظر لامتناهٍ في الصغر من أجل المثلّث متساوي الأضلاع، بينما يكون التغيير الدوراني اللامتناهي في الصغر عمليةً تناظرية بالنسبة إلى الدائرة.

هذا اختلافٌ كبير بين تناظر المثلّث متساوي الأضلاع وتناظر الدائرة، إذ لا يحتوي السابق على عمليات تناظرية لامتناهية في الصغر (علينا أن نرفع المثلّث ثم نقوم بتدويره بمقدارٍ لا يقلّ عن 120 درجة ـ أو نقوم بقلبه ـ لكي نقدر على وضعه فوق المثلّث الآخر)، بينما في حالة التناظر اللاحق يكون أيُّ دورانٍ صالحاً ـ حتى ولو كان بمقدار 0,000000001 درجة ـ ويُعَدّ عمليةً تناظرية للدائرة.

تشكّل مجموعةُ العمليات التناظرية للدائرة بدورها زمرةً، أطلق الرياضياتيون عليها أيضاً اسماً خاصّاً: U (1). نرى أنّ هذه الزمرة تحتوي على عددٍ لانهائي من العمليّات، ولا توجد عمليات تناظرية أصغرية غير معدومة فيها. بمقارنة الزمرة الأخيرة بزمرة تناظر المثلّث متساوي

الأضلاع، نقول إنّ زمرة تناظر المثلث **متقطّعة** لأنها تتضمّن خطواتٍ متقطّعة ولا تحتوي على عملياتٍ لامتناهية في الصغر؛ بينما نقول عن زمرة تناظر الدائرة بأنها **مستمرّة** أو **متّصلة** لأنّ لها عمليات لامتناهية في الصغر بحيث تحتوي على عددٍ لانهائي من عمليّات التناظر.

بما أنّ زمر التناظر المستمرّة تحتوي على عددٍ لانهائي من العمليّات التناظرية ـ أو من العناصر ـ فإننا لا نستطيع كتابةَ جدول الضرب الموافق لها؛ لأنّ عدد خلايا الجدول سيكون مساوياً لـ لانهاية × لانهاية. كيف يمكننا إذاً أن نحلّل زمرَ التناظر المستمرّة؟ يمكن أن يخمّن الطلاب الذين درسوا التحليل الرياضياتي أنّ مفهوم **معدّل التغيّر** أو **المشتقّ** ـ الذي يُطبَّق عادة على التوابع المستمرّة ـ سيكون صالحاً أيضاً من أجل التناظرات المستمرّة. في الواقع يقودنا هذا الأمر إلى قلب منهجية تصنيف التناظرات المستمرّة، فبدلاً من تحليلِ مجملِ الجدول الضربي للزمرة نستطيع أن ننظرَ فقط إلى عملياتٍ تناظرية صغيرة أو لامتناهية في الصغر (من أجل تعريف مشتقّ عملية الدوران بالنسبة إلى الزاوية). تُدعى هذه «المشتقّات» بـ**مولّدات** الزمرة، ومن معرفة المولّدات يمكن إعادة إنشاء جميع العمليات التناظرية.

تشكّل **المولّدات** بحدّ ذاتها منظومةً رياضياتيةً مستقلّةً خاصّةً بنفسها، تُدعى بـ**جبر لي** نسبةً إلى الرياضياتي النرويجي الشهير سوفوس لي (Sophus Lie) الذي وُلد عام 1842 وكان رائداً في هذه التقنية[3]. من خلال أخذ جبور لي بعين الاعتبار بدلاً عن

---

(3) وجد سوفوس لي (Sophus Lie) صعوبة جمّة في إقناع زملائه الأنداد بأهمية جبر الزمر المستمرّة الذي عمل به، وانتهى الأمر به في آخر المطاف إلى الجنون، انظر: .J. J O'connor and E. F. Robertson, «Marius Sophus Lie,» www.gas.dcs.st-and.ac.uk (وفقاً لتصفّحنا بتاريخ 18 حزيران/ يونيو 2004).

المجموعات اللامنتهية للتحويلات التناظرية، أصبح مستطاعاً تحديدُ جميع التناظرات المستمرّة ممكنة الوجود، وتمّ تصنيفها من قبل الرياضياتيين وخاصةً الرياضياتي إيلي جوزيف كارتان (Elie-Joseph Cartan) في أوائل القرن العشرين.

جبر لي الموافق لزمرة التناظر U(1) بسيط لدرجة التفاهة («تافه»)، إذ يحوي مولّداً وحيداً لأنه لا يوجد سوى اتجاه واحد فقط لا غير نستطيع تدوير الدائرة حوله. تأتي الكرة في المحطة التالية ونحن نخطو نحو الأعلى، فهي «دائرةٌ في ثلاثة أبعاد». لنتصوّر الكرة تطفو في الفضاء مع بقاء مركزها مثبّتاً في نقطةٍ معيّنة من ذلك الفضاء (على سبيل المثال تخيّل كرةَ سلّة طافيةً في الفضاء شرط أن يكون مركزها قد تمّ تثبته في نقطة معيّنة). لنتخيّل جميعَ التناظرات (الدورانات) التي يمكن القيام بها والتي تضع الكرةَ فوق نفسها مع بقاء مركزها ثابتاً. من الواضح أنّ هناك عدداً لانهائياً من مثل هذه الدورانات. ولكنّ كرةَ السلّة ـ أو الكرة بشكل عام ـ تختلف عن الدائرة المُلزَمة بالوجود ضمن مستوٍ ثنائي الأبعاد، فنحن بالمقابل نستطيع تدوير الكرة حول أيّ خطّ مستقيم يمرّ من مركزها، وجميع هذه الدورانات تُبقي الكرةَ فوق نفسها.

هناك ثلاثة مولّدات متمايزة بالنسبة إلى الكرة، وهي الدورانات الصغيرة حول المحاور الخيالية x وy وz. هناك أيضاً عدد لانهائي من عمليات التناظر للكرة، ومن الواضح أنّ هناك عمليات تناظرية أكثر بمقدارٍ لامتناه في حالة الكرة منها في حالة الدائرة، لأننا نستطيع تدوير الكرة في ثلاثة أبعاد. يدعو الرياضياتيون مجموعةَ عمليات التناظر التي تبقي الكرة لامتغيّرةً (صامدةً) بزمرة التناظر SU (2) (وهي تكافئ زمرةً أخرى تُدعى SO (3)، والتكافؤ في الحقيقة ليس صحيحاً

تماماً لأنّ SU (2) تحوي SO(3)، ولكنّ هذه نقطة تتميَّز بالحذق ولن ندخل في تفاصيلها)(*).

إذا رمزنا إلى المولّدات الثلاثة المتمايزة لـ SU(2) بـ T_x وT_y وT_z، فإنّ أيّ عملية دوران ـ ونعني أيّ عنصر من الزمرة SU (2) ـ تُكتب بالشكل: $exp\ (iT_x\theta_x + iT_y\theta_y + iT_z\theta_z) = 1 + iT_x\theta_x + iT_y\theta_y + iT_z\theta_z$ حيث θ_x وθ_y وθ_z **زوايا** (أو «**وسائط**») **الدوران** للعنصر المُعتبَر من الزمرة. لقد كتبنا الشكل التقريبي من أجل زوايا دوران صغيرة جداً، ويُعرَّف التابع الأسّي هنا من خلال نشره على شكل متسلسلة.

ومرة أخرى نلتقي هنا بخاصّيةِ اللاتبديلية الغريبة. إذا أجرينا دوراناً للكرة ـ ولندْعُه A ـ ثم أتبعناه بدورانٍ آخر ـ ولندعُه B ـ فإننا نحصل على نتيجة نرمز لها بـ $A\ x\ B$. يمكننا الآن إجراء هذَين الدورانَين، ولكن بترتيبٍ معاكس لنحصل على $B\ x\ A$. نجد في الحالة العامة أنّ $A\ x\ B$ لا يساوي $B\ x\ A$، وتُدعى هذه الخاصّية كما رأينا بالخاصّيّة اللاتبديلية. عبر تناولنا لدورانٍ لامتناهٍ في الصغر حول محور الـ x يليه دوران لامتناهٍ في الصغر حول محور الـ y، ثم من خلال اعتبارنا لتركيب نفس الدورانَين ولكن بترتيبٍ معاكس، فإننا نجد أنّ المولّدات تحقّق العلاقات: $T_xT_x - T_yT_z$ و$T_yT_z - T_zT_y$ و$T_zT_x - T_xT_z = 2iT_y$. تعرِّف هذه العلاقات جبر لي للزمرة SU(2) تماماً كما عرّف الجدول الضربي الزمرةَ S3. تمثّل هذه العلاقاتُ المقابلَ لجداول الضرب الموجودة في حالة الزمر المتقطّعة والمحتوية

(*) النقطة الرئيسية هنا هي أنّ جبرَي لي للزمرتَين SU (2) وSO (3) متطابقان، بينما لا تكون الزمرتان متكافئتَين بل يكون هناك تابع تشاكلي غامر يرتبط وفقه كلّ عنصرَين من SU (2) بعنصرٍ من SO (3).

على عدد منته من العناصر. لدينا الآن عدد منته من المولّدات تحقّق قواعد جبر لي غير التبديلية. لقد تمّ اختزالُ مسألة تصنيف جميع التناظرات المستمرّة إلى مسألة تصنيف جميع جبور لي.

إنّ التركيبات مثل $T_xT_y - T_yT_x$ مهمة جداً في نظرية الزمر في ميكانيك الكمّ (وحتى في الميكانيك التقليدي الكلاسيكي) بحيث أُطلِقَت عليها تسمية خاصّة. تُدعى هذه المقادير بـ**المبادلات**، وتُكتب $[T_x, T_y]= T_xT_y - T_yT_x$. وممّا يجدر ذكره هنا أنّ ضرب مولّدات الزمرة هو عملية تجميعية.

في كثيرٍ من الأحيان ينفصل جبر لي إلى قسمَين اثنَين أو أكثر، حيث يتبادل (أي ينعدم مبادل) كلّ قسمٍ بشكلٍ تامّ مع الأقسام الأخرى. يمثّل جبر لي حينئذٍ تناظرَينَ ـ أو أكثر ـ متمايزَين ومنفصلَين. تُدعى زمرُ لي التي لا تقبل جبورُها التحليلَ بهذه الطريقة بـ**الزمر البسيطة**. يمكن الحصول على الزمر الأكثر تعقيداً عبر «ضرب» زمرتَي تناظر معاً ضمن معنى الجداء الديكارتي. نقدّم مثالاً عن ذلك من خلال كواركٍ ثقيل ولنقُل إنه الكوارك القعري (أو الجميل) b. لهذا الكوارك تدويم (سبين) وبالتالي هو يمثّل تناظر الدورانات SU(2)، ولكنْ له أيضاً لون كواركي وبالتالي فهو يمثّل في الوقت نفسه تناظر اللون الكواركي SU(3). إذاً يكون التناظر الشامل الذي تخضع له كواركات الـ b هو الزمرة المركّبة ـ أو **زمرة الجداء** ـ $SU(2) \times SU(3)$، حيث تتبادل (تنعدم مبادلات) جميع دورانات الـ SU(3) اللونية مع جميع دورانات الـ SU(2) التدويمية (السبينية).

تمّ إنجازُ التصنيفِ الكاملِ لجبور لي البسيطة في أوائل القرن العشرين، ويُعرَف باسم **تصنيف كارتان**، وهو يحوي ما يلي:

1 ـ التناظرات الدورانية للكرات التي تعيش في N بعد حقيقي من الإحداثيّات:

2 ـ التناظرات الدورانية التي تعيش في N بعد عقديّ من الإحداثيّات:

3 ـ الزمر المنجدلة وهي تمثّل تناظرات N هزّاز توافقي:

4 ـ الزمر الاستثنائية:

على سبيل المثال تُدعى الزمر SO(N) بـ «الزمر المتعامدة الخاصّة»، وهي تناظرات الكرات التي تعيش في فضاءٍ بـ N بعد، حيث إحداثيات الفضاء أعداد حقيقية. وبالتالي تكون هي مجموعةَ التحويلات التابعيّة $(x_1,x_2,...,x_N) \to (x'_1,x'_2,...,x'_N)$ التي تحافِظ على الكرة الواحديّة ذات الـ N بعد: $1 = x_1^2 + x_2^2 + ... + x_N^2 = x_1'^2 + x_2'^2 + ... + x_N'^2$. لاحظ أنّ هناك انعكاسات ـ وهي تحويلات متقطّعة ـ تُبقي كذلك الكرة لامتغيّرةً (صامدة) مثل: $(x_1,x_2,...,x_N) \to -(x_1,x_2,...,x_N)$، ولكننا لم نشملها في تعريف الـ SO(N)، ولذلك لدينا الحرف S في SO(N) للدلالة على صفة (الخاصّة) بالإنجليزية (Special) (تحتوي تقنياً «الزمرُ المتعامدة» O(N) على هذه الانعكاسات المتقطّعة).

بالمقابل تُدعى الزمر SU(N) «الزمر الأحاديّة الخاصّة»، وهي تناظرات الكرات التي تعيش في فضاءٍ بـ N بعد، حيث إحداثيات الفضاء أعداد عقديّة. وبالتالي تكون هي مجموعةَ التحويلات التابعيّة $(z_1,z_2,\cdots,z_N) \to (z'_1,z'_2,\cdots,z'_N)$ التي تُبقي على معادلة الكرة الواحدية العقدية ذات الـ N بعد عقدي: $1 = |z_1|^2 + |z_2|^2 + \cdots + |z_N|^2 = |z'_1|^2 + |z'_2|^2 + \cdots + |z'_N|^2$.

لهذه التناظرات صلة مهمّة بميكانيك الكمّ، لأنّ الحالة الفيزيائية

لمنظومةٍ ما يُنظَر إليها كشعاع في فضاء عقدي (يُعتبَر هذا في الحقيقة وصفاً أكثر أساسيّة من التابع الموجي). إنّ لونَ الكوارك مثلاً شعاعٌ في فضاء ثلاثيّ الأبعاد العقديّة، حيث نرمز لمحاوره (ذات الإحداثيّات العقدية) بـ «أحمر» و«أزرق» و«أصفر»، فتكون زمرة تناظر اللون هي SU(3). لا نشمل هنا في تعريف SU(N) العوامِلَ المشتركة الإجمالية لـ U(1) والتي هي جزءٌ لا يتجزّأ من التناظر (تقنياً تحتوي «الزمرُ الأحاديّة» U(N) على هذه العوامل الإضافية لـ U(1)). أمّا الزمر المنجدلة فلها لاتغيّر (صمودٌ) مماثل، وهي تؤثّر على أشعة يبلغ بُعدُها 2N ومركّباتها أعدادٌ لا تتبادل مع بعضها البعض.

وأخيراً تأتي **الزمر الاستثنائية** الشهيرة G_2, F_4, E_6, E_7, E_8. لا تمتلك هذه الزمر تفسيراتٍ واضحة لتناظراتها، ولكنّ لها خصائصَ لافتةً للنظر جعلتها تمثّل دائماً زمرَ تناظرٍ جذّابةً وآسرةً من منظور التوحيد الكبير لجميع القوى الأساسية في الطبيعة التي توصف من خلال تناظرات المعيار الموضعي. يحدث هذا الأمر لأنّ القوى في الطبيعة يتمّ وصفها عبر الزمر المعيارية $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ التي تنغمر بشكل طبيعي (أي إنها **زمرٌ جزئية** بمعنى أنها زمرٌ أصغر محتواة ضمن زمرٍ أكبر) في الزمرة SU(5)، والتي تنغمر بدورها ضمن SO(10). مثّلت الزمرة SU(5) أول مثال مقنعٍ عن نظرية توحيدية كبرى، اقترحها في منتصف السبعينيات هوارد جيورجاي (Howard Georgi) وشيلدون غلاشو (Sheldon Glashow). تنغمر زمرة SO(10) بدورها وبشكل طبيعي ضمن مجموعةٍ من زمرٍ استثنائية متداخلة ضمن بعضها البعض: $SO(1) \subset E_6 \subset E_7 \subset E_8$.

بيّن جون شفارتز (John Schwartz) ومايك غرين (Mike Green) في الثمانينيات أنّ كبرى الزمرِ الاستثنائية E_8 (في الحقيقة الجداء المباشر $E_8 \times E_8$) ذات صلةٍ وثيقة بنظرية الأوتار، حيث تُمثّلُ

أحَدَ التناظرات القلّة التي يسمح بوجودها الاتّساقُ الداخلي والخلوُّ من التناقضات الظاهرية والتي يتمتّع بها عالَمٌ تصفه نظرية أوتار فائقة ميكانيكية كمومية. قاد هذا الأمر ـ مع حقيقة كون نظرية الأوتار تظهر محتويةً وبشكلٍ طبيعي على ثقالةٍ كمومية متّسقة وخالية من التناقض ـ إلى اهتمامٍ كبيرٍ بنظرية الأوتار الفائقة كنظرية نهائية لجميع القوى الأساسية في الطبيعة.

الثبت التعريفي

أبعاد هندسية فيزيائية (Engineering Dimensions): الأبعاد التي يمكن التعبير عن مقادير الفيزياء بدلالتها، وتشمل في الفيزياء الكلاسيكية الطول والزمن والكتلة، فمثلاً: السرعة لها بعد طول على بعد زمن.

أثر دوبلر (Doppler Effect): تغيّر التواتر الذي نقيسه لموجةٍ صادرةٍ من منبعٍ ما عندما يتحرّك هذا المنبع بالنسبة إلينا.

أثير (Ether): وسط افتراضي بصفاتٍ غريبة كان يُظَّن بأنه يغمر كلّ شيء وأنّ الضوء ينتشر فيه.

إجرائية (عملية) وحيدة العروة (أو الطوق) (One-loop Process): مساهمة في إجراء حساب في نظرية الاضطراب تتضمّن مشاركة زوج اعتباري (افتراضي) واحد من الجسيمات.

إجهاد (Stress): قياسٌ لشدّة القوى الداخلية ـ ضمن جسم ما وعبر سطوحٍ تخيّليّة داخلية ـ الناجمة عن التأثير في قوى خارجيّة، وله بعد قوة على سطح.

أحاديات قطب مغناطيسية (Magnetic Monopoles): جسيمات افتراضية هي عبارة عن مغانط ولكن بقطب وحيد.

أحادية (Singlet): تعبير يعني في ميكانيك الكمّ منظومةً لها

حالة كمومية واحدة (كأن تكون بتدويم - سبين مساوٍ للصفر).

استيفاء/ استكمال خارجي/ تقدير استقرائي (Extrapolation): القدرة على استخلاص قيمة تابع ما (أو معطيات) غير معروفة من خلال القيم التي سبقت معرفتها (خارج معطيات معروفة مسبقاً).

إشعاع الخلفية الكوني ذو الموجات المكروية (الصغرية) (Cosmic Microwave Background Radiation): إشعاع مكروي (ذو أمواج مكروية) يغمر الكون، تشكّل عند الانفجار العظيم ثم خفّ أي تبرّد مع تمدّد الكون وتوسّعه.

أشعة سينية (X-Rays): إشعاع كهرمغناطيسي بأطوال موجية من 10 إلى 0,001 نانومتر.

أعداد عقدية (مركّبة) (Complex Numbers): توسيع رياضياتي للأعداد الحقيقية، يتضمن احتواء كلّ عدد عقدي على جزأين يسمحان بكتابته بالشكل: $z = a + ib$ حيث a, b عددان حقيقيان و$i^2 = -1$.

أفق الحدث (حادثة) (Event Horizon): سطح ثقب أسود ذو مسير باتجاه واحد، حيث إنّه - بمجرّد أن يدخله شيء ما - يقع في أسر قوة جاذبية الثقب الأسود الثقالية الهائلة ولا يستطيع الفكاك منها أبداً.

إلكتروديناميك كمومي (ديناميكا كهربائية كمومية) (QED) (Quantum Electrodynamics): نظرية حقل كمومي نسبوية للقوة الكهرمغناطيسية وللإلكترونات، تتضمن النسبية الخاصة، وتصف الحقل الكهرمغناطيسي باعتباره مكمّماً مكوّناً من فوتونات.

إلكترون خارجي (Outer Electron): إلكترون في الطبقة الخارجية غير المملوءة يشارك في التفاعلات الكيميائية.

آلية هيغز (Higgs Mechanism): الآلية التي يكتسب بها بوزون المعيار كتلتَه من خلال تفاعله مع حقل خلفية لجسيم هيغز. يستخدم النموذج المعياري هذه الآلية لتوليد كتل الجسيمات الأولّية كذلك.

أملس (Smooth): صفة لتابع يقبل الاشتقاق إلى المرتبة التي نرغب فيها.

أنتروبية (قصور) (Entropy): تابع يقيس درجة تشوّش (عدم انتظام أو فوضى) جملة فيزيائية ما، ويمثّل عدد طرق ترتيب مقوّماتها التي لا يؤدّي التغيير في ما بينها إلى تبدّل المظهر الخارجي للجملة.

انتهاك (Violation): عدم التمتّع بصفة معيّنة، مثلاً انتهاك تناظر الـ CP من قبل القوى الضعيفة يعني عدم تمتّعها بهذا التناظر.

انحناء (تقوّس) (Curvature): هو تباعد شيء ما (بما في ذلك المكان والزمان) عن شكله المسطّح والمستوي، وبالتالي ابتعاده عن قواعد الهندسة الإقليدية.

اندفاع (كمية الحركة/ الزخم) (Momentum): يساوي في ميكانيك نيوتن جداءَ الكتلة في السرعة.

اندفاع زاويّ (عزم كمية الحركة) (Angular Momentum): الاندفاع الزاويّ $\vec{L}$ لجسيم في النقطة M بالنسبة إلى المبدأ O هو «عزمُ» اندفاعِه (كمية حَركته) $\vec{p}$، أي الجداءُ الخارجي للذراع بالاندفاع: $\vec{L} = \overrightarrow{OM} \times \vec{p}$.

اندفاع زاوي مداري (Orbital Angular Momentum): الاندفاع الزاوي الناجم عن الحركة المدارية.

اندماج نووي (Nuclear Fusion): اتّحاد نوى خفيفة لتشكيل نواة أثقل مع تحرير طاقة.

انزياح نحو الأحمر لإينشتاين (Einstein Redshift): زيادة في طول موجة الضوء يحدث ـ وفقاً للنسبية العامة ـ عند تحرّكه ضمن حقلٍ ثقالي، ويدلّ على تباطؤ معدّل مرور الزمن.

انسحاب (Translation): تحويل يتمّ فيه تحريك مبدأ الإحداثيات من دون تغيير محاورها.

انشطار نووي (Nuclear Fission): تفاعل نووي تنشطر فيه النواة

الأمّ إلى نوى بنات أصغر مع إطلاق نترونات حرّة غالباً.

انعراج/ شبكة انعراج (Diffraction/ Diffraction Grating): يشير الانعراج عادةً إلى ظواهرَ تحدث عندما تلاقي الموجة عائقاً ما، حيث يصبح جليّاً انعطاف الموجة حول العوائق الصغيرة.

انعطاف/ انحناء (Bending): تغيّر في المسار المتوقّع، مثلاً: ينعطف الضوء عندما يمرّ بالقرب من جسم ثقيل.

انفجار عظيم (Big Bang): نظريةٌ عن أصل الكون وتطوره مقبولة في الوقت الحاضر تقول بأنّ الكون انطلق منذ حوالي 15 مليار سنة من حالة أولية كانت بمثابة شدفة صغيرة جداً ذات طاقة وكثافة هائلتين وخاضعة لانضغاطٍ مفرَطٍ جداً، وهو منذ ذلك الحين في حالة تمدّد وتوسّع.

بئر كمومي (Quantum Well): بئر كموني يقيّد حركةَ جسيم ما، وتصبح الآثار الكمومية جليّة عندما يكون عرضه من رتبة طول موجة دو برولي (De Broglie) الموافقة للجسيم، ممّا يقتضي تكميمَ الطاقة.

بارالاكس (أثر اختلاف المنظر) (Parallax): اختلاف اتّجاه جسم ما (أو انزياح ظاهري في موضعه) عندما يُنظر إليه وفقاً لخطَّي رؤية مختلفَين.

بارامتر/ وسيط (Parameter): ثابت اختياري تؤثّر قيمته في الطبيعة المعيّنة للتعبير الرياضياتي، ولكن ليس في خواصّه الصوريّة. مثال: الثابتان الاختياريّان a, b في $ax^2 + bx + c = 0$.

باريونات (Baryons): جسيمات مركَّبة تتألّف من ثلاثة كواركات.

بُعد (Dimension): هو محور أو اتجاه في المكان أو الزمكان. للمكان المألوف حولنا ثلاثة أبعاد (هي الاتجاهات من اليسار إلى اليمين ومن الأعلى إلى الأسفل ومن الأمام إلى الوراء). وللزمكان

المألوف أربعة (هي المحاور الثلاثة السابقة ومحور الماضي - المستقبل).

بوزون (Boson): جسيمات تخضع لإحصاء بوز - إينشتاين، وتكون ذات قيم تدويم (سبين) صحيحة. يمكن أن تكون أوّليّة كالفوتون أو مركَّبَة مثل اَلبيون.

بوزون المعيار الضعيف (Weak Gauge Boson): أصغر رزمة لحقل القوة الضعيفة، وهو الجسيم الرسول لهذه القوة، ويُسمّى بوزون W أو بوزون Z.

بوزونات معياريّة (بوزونات المعيار) (Gauge Bosons): هي كمّات القوى التي تتآثر بواسطتها الجسيمات الأوّليّة في نظرية معيارية.

بوزيترون (Positron): الجسيم المضادّ للإلكترون.

بيون (Pion): أخفّ الميزونات، وهو أحد ثلاثة أنواع: $\pi^{+} = ud, \pi^{-} = ud, \pi^{0} = ud, ud$

تابع موجي (Wave Function): تابع رياضياتي كان يحدّد كلاسيكياً مقدارَ ارتفاع الموجة في كلّ نقطة من المكان وفي كلّ لحظة من الزمن، لكنه أصبح في ميكانيك الكمّ يعبّر عن أمواج احتمالية تتضمّن جميعَ المعلومات عن منظومةٍ ما.

تافه (Trivial): صفة لكائن رياضياتي (مثلاً: زمرة، حلّ جملة معادلات) بنيته بسيطة جداً.

تبادل مضادّ، تخالف (Anticommutation): خاصّيّة تعبّر عن الضرب بـ 1- عندما يُعكَس ترتيب الجداء: $A \times B = B \times A$.

تباطؤ (Deceleration): تسارع سالب القيمة.

تبديلي (Commutative): ذو قدرة على تغيير ترتيب إجراء العملية من دون تغيير الناتج، مثلاً: $A \times B = B \times A$.

تبعثر/ بعثرة (Scattering): إجرائية فيزيائية تغيّر خلالها

الجسيمات من مسارها بسبب وجود عدم انتظام ناجم مثلاً عن وجود جسيمات أخرى أو حقل كموني.

تجميعي (تزامُلي) (Associative): تكون العلاقة الثنائية* تجميعية إذا حققت دوماً: $x^* (y *z) = (x *y) *z$.

تحلّل (انحلال)، تفكّك (Decay): نوع من أنواع النشاط الإشعاعي يتفكّك فيه الجسيم الأصلي تلقائياً إلى جسيمات أخرى.

تحليل (Decomposition): التحليل الكيميائي لجسمٍ ما هو فصله إلى عناصره المكوِّنة.

تحليل فوريه (Fourrier Analysis): دراسة وتطبيق متسلسلات فورييه (متسلسلات مثلّثاتيّة تُقرِّب أيّ تابع دوريّ أملس) والتكاملات ذات العلاقة في حلّ المعادلات التفاضلية ومعادلات الفيزياء الرياضياتية.

تحويل الانعكاس (Reflection Transformation): هو قلب المحاور الثلاثة عند إجراء الانعكاس بالنسبة إلى المبدأ، بينما تُقلَب إحداثيةٌ واحدة عند إجراء الانعكاس بالنسبة إلى مستوٍ وهي التي توافق المحور العمودي على هذا المستوي.

تحويل غاليليو (Galilean Transformation): تحويل الإحداثيات ـ وفقاً لميكانيك نيوتن ـ بين مرجعَين يتحرّكان بالنسبة إلى بعضهما البعض حركة مستقيمة منتظمة.

تحويل لورنتز (Lorentz Transformation): تحويل يعبّر رياضياتياً عن الانتقال بين جمل الإحداثيات الزمكانية المختلفة في نظرية النسبية الخاصةّ. وتقنياً هو عنصر من زمرة لورنتز التي هي مجموعة التحويلات على الفضاء رباعي الأبعاد (x_1, x_2, x_3, x_4) المحافِظة على الشكل التربيعي: $x_1^2 - x_2^2 - x_3^2 - x_4^2$، وتولّدها الدورانات في المكان الثلاثي والمعزّزات الموافقة للمحاور المكانية الثلاثة.

تداخل (Interference): ظاهرة تتراكب فيها موجتان أو أكثر لتؤلّفا موجةً جديدة، تبلغ قيماً أعظمية عندما يكون التداخل بنّاءً (متعاضداً) وقيماً أصغرية عندما يكون التداخل هدّاماً (متعاكساً).

تدويم (سبين)، اندفاع زاوي تدويمي (سبيني) (Spin/ Spin Angular Momentum): دلالة كمومية للمفهوم المألوف عن الدوران الدوّاميّ. تملك الجسيمات مقداراً ذاتياً من التدويم أي من الاندفاع الزاوي التدويمي (السبيني) الصميمي، هو عدد صحيح أو نصف عدد صحيح (من مضاعفات ثابت بلانك) لا يتغيّر أبداً.

ترابط (Correlation): يعبّر الترابط بين مقدارَين فيزيائيَّين عن القدرة على التنبّؤ بقيمة أحدهما إذا عرفنا قيمة الآخر.

ترافق (رفْق) الشحنة (Charge Conjugation): العملية التي نستبدل فيها بالجسيمات مضادّاتها التي تعاكسها في الشحنة. تبقى القوى الكهرمغناطيسية والشديدة ـ بخلاف القوى الضعيفة ـ لامتغيّرةً عند تطبيق ترافق الشحنة.

تراوحات كمومية (Quantum Fluctuations): سلوك اضطرابي هائج لجملة على المستوى المجهري، يسبّبه مبدأ الارتياب أو عدم التعيين لهايزنبرغ.

تركيب (اصطناع) نووي بدائي (Primordial Nucleosynthesis): إنتاج نوى ذرية خلال الدقائق الثلاث الأولى التي تلت الانفجار العظيم، وأدّت إلى تشكيل الهيدروجين حوالي $\frac{3}{4}$ مادة الكون والهليوم حوالي $\frac{1}{4}$.

تسارع (Acceleration): معدّل تغيّر (أو مشتقّ) السرعة بالنسبة إلى الزمن.

تشكيلة (Configuration): أيّ شكل يتضمّن ترتيباً معيّناً للمكوِّنات، مثلاً تشكيلة الإلكترونات لذرّة ما هي تحديد كيفية توزّع إلكتروناتها في المدارات الإلكترونية، وهكذا يكون التشكيل الإلكتروني لذرّة النيون هو $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$.

تشويه/ تعديل شكل (Deformation): تغيير شكل شيءٍ ما تحت تأثير قوّة مطبّقة، وهناك التشويه المرن القابل للانعكاس والتشويه غير المرن الذي لا يمكن عكسه.

تصحيحات كمومية (Quantum Corrections): تصحيحات ناجمة عن اعتبارات كمومية كأن تكونَ مساهماتٍ لمخطّطات أعلى لفاينمان في بعض الحسابات.

تضخّم (Inflation): تعديل على اللحظات الأولى (10^{-35} ثانية بعد البداية) لعلم الكونيات المعياري وفق منظور الانفجار العظيم، يعاني فيه الكون طفرات لحظية من توسّع هائل.

تقلّص (Contraction): نقصان القدّ، مثلاً يتقلّص طول قطعة حديد بانخفاض درجة الحرارة.

تقلّص الأطوال (Length Contraction): سمة ناجمة عن النسبية الخاصة يتقلّص فيها طول جسم متحرّك باتجاه حركته، ويكون هذا الأثر ملحوظاً عندما تكون سرعة الجسم قريبة من سرعة الضوء.

تكاثف (Condensation): تحوّل المادة من الطور الغازي إلى الطور السائل.

تماسك (Coherence): نقول عن موجتَين إنهما متماسكتان إذا كان لهما نفس الفرق النسبي في الطور، وهذا يقتضي كون تواترهما نفسه.

تمدّد الأزمنة (Time Dilation): تباطؤ جريان الزمان وفقاً للنسبية الخاصة عند راصد متحرّك.

تناظر (Symmetry): خاصيّة جملة فيزيائية لا تتبدّل عندما تتحوّل الجملة على نحو ما، فالكرة ذات تناظر دوراني لأن مظهرها لا يتغيّر عند تدويرها.

تناظر استثنائي (Exceptional Symmetry): تناظر موافق لإحدى الزمر الاستثنائية (G_2, F_4, E_6, E_7, E_8) حسب مخطّطات دينكين

(Dynkin)، وسُميّت كذلك لأنها لا تقع ضمن حدود متسلسلة لا نهائية لزمر متزايدة الأبعاد.

تناظر الانعكاس (Reflection Symmetry): عدم تغيّر المنظومة إذا ما نظرنا إليها من خلال المرايا.

تناظر التبادل (Exchange Symmetry): هو عدم تغيّر أيّ مقدار ملحوظ يخصّ المنظومة الفيزيائية التي تتّصف به إذا ما بادلنا بين موقعَي جسيمَين متطابقَين فيها.

تناظر الكوارك الثقيل (Heavy Quark Symmetry): بقاء تشكيلة درجات الحرية الموافقة للكواركات الخفيفة ـ في منظومة تحوي كواركاً ثقيلاً واحداً ـ نفسها إذا ما استبدلنا بهذا الكوارك الثقيل كواركاً ثقيلاً آخر من نكهة وتدويم (سبين) مختلفَين ولكن بالسرعة ذاتها.

تناظر دوراني (Rotational symmetry): عدم تغيّر المنظومة عند إجراء تحويل دوراني عليها أي عندما يتمّ تدويرها حول المبدأ.

تناظر فائق (Supersymmetry): مبدأ تناظر يربط خصائص الجسيمات التي قيم تدويمها (سبينها) أعداد صحيحة (البوزونات)، بخصائص الجسيمات التي قيم تدويمها (سبينها) نصف عدد صحيح فردي (الفرميونات).

تناظر المعيار (الموضعي)/ تحويل معياري أو تحويلٌ لِمعيار/ نظرية معيارية أو نظرية معيار ((Local) Gauge Symmetry/ Gauge Transformation/ Gauge Theory): مبدأ تناظري يُعدّ أساس وصف ميكانيك الكمّ للقوى غير الثقالية الثلاث؛ ويعني عدم تغيّر الجملة الفيزيائية عند خضوعها لتحويلات معيارية، وهي تبدّلات مختلفة في «شحنات» القوى المذكورة تكون موضعية أي يمكن أن تتغيّر من موضع إلى آخر ومن لحظة إلى أخرى .وأيّ نظرية تتضمّن هذا المبدأ تُسمَّى نظرية معيار موضعية.

تناظر متقطّع (Discrete Symmetry): تناظر يوافق زمرة متقطّعة، مثل الزوجية وترافق الشحنة وقلب الزمن.

تناظر منكسر (منفصم/ متحطِّم) (Broken Symmetry): يُقصَد بانكسار التناظر الدوراني لجسيم ما عدم بقائه هو نفسه إلاّ عند تدويره بزوايا معيّنة، أمّا كسر التناظر الآني فيحصل عندما تأخذ الحالة الأساسية (الأرضية) لمنظومة ذات تناظر مستمرّ قيمةً لا تتمتّع بهذا التناظر.

تناظم/ اصطفاف/ تراصف (Alignment): ترتيب «شكلي» مميَّز، مثاله النموذجي: اصطفاف السبينات بعضها بجانب بعض بحيث تكون متوازيةً في الاتّجاه.

تواتر (Frequency): عدد الدورات الكاملة التي تتمّها موجة في ثانية.

توضيب (تكويم) أكثر تراصّاً للكرات (Closest Packing of Spheres): إنشاء شبكة منتظمة من الكرات مكوّمة بشكلٍ كثيف بحيث تشغل أكبر جزءٍ ممكن من مكانٍ معيّن.

تيّار محفوظ/ مصون (Conserved Current): مقدار شعاعي يعبّر عن مصونية مقدار سلّمي لشحنة ما، وتقنياً يجب أن يحقّق التيّار المحفوظ j^{μ} معادلة الاستمرارية: $\partial_{\mu} j^{\mu} = 0$، وعندها يكون المقدار السلّمي المصون Q مساوياً لـ: $Q = \int j_{v}^{0} dV$.

ثابت الثقالة لنيوتن (Newton's Gravitational Constant): ثابت فيزيائي تتضمنه نظرية نيوتن الشمولية للثقالة التي تنصّ على أنّ قوة التجاذب ما بين جسمين تتناسب طرداً مع كتلتيهما وعكساً مع مربع المسافة الفاصلة، بثابت تناسب $G_N \approx 6.6 \times 10^{-11}\ m^3 kg^{-1} s^{-2}$.

ثابت القرن (اقتران)/ ثابت الربط (ارتباط) (Coupling Constant): ثابت يحدّد قوّة الارتباط وشدّته. على سبيل المثال تحدّد

الشحنة الكهربائية للإلكترون شدّة تفاعله مع الفوتون ضمن نظرية الإلكترودیناميك الكمومي.

ثابت بلانك (Planck's Constant): يُرمز له بـِ h، وتبلغ قيمته 1.05×10^{-27} غ. سم\ ثا، وهو وسيط أساسي في ميكانيك الكمّ، يحدّد قياس الوحدات المنفصلة للطاقة والكتلة والسبين في العالَم المجهري.

ثقالة (Gravitation): أو هي القوى الأساسية الأربع في الطبيعة. وصفها نيوتن أولاً في نظريته الشمولية عن الثقالة، ووصفها إينشتاين لاحقاً في النسبية العامة.

ثقالة كمومية (Quantum Gravity): نظرية تجمع بنجاح ما بين ميكانيك الكم والنسبية العامة، ويتم فيها غالباً تعديل إحدى النظريتين أو كلتيهما بحيث تنجح في وصف الثقالة كمومياً.

ثقب (Hole): فجوة مخالفة بخصائصها لما يحيط بها، ويهمنا هنا مثال اختفاء إلكترون من بحر ديراك الذي يخلّف ثقباً مكانه فيخلق بذلك بوزيتروناً معاكساً له في الشحنة.

ثقب أسود (Black Hole): منطقة في الزمكان يلتقط ويأسر حقل جاذبيتها الثقالي الهائل كل شيء يمر بجوارها (حتى الضوء)، وذلك إذا ما اقترب منها إلى مسافة قصيرة معيّنة (أقرب إلى الثقب من أفق حدثه).

ثلاثية (Triplet): تعبير يعني في ميكانيك الكمّ منظومةً لها ثلاث حالاتٍ كمومية ممكنة (كأن يكون تدويمها ـ سبينها مساوياً للواحد).

ثنائية (Doublet): تعبير يعني في ميكانيك الكمّ منظومةً لها حالتان ممكنتان (كأن يكون تدويمها 1/2).

ثِنْوي/ ثِنوية (Dual/ Duality): هي حالة أو وضع تكون فيه لنظريتين ـ أو أكثر ـ متباينتين تماماً نتائجُ فيزيائية متطابقة. وتشير في ميكانيك الكمّ إلى تمتّع الكائنات المجهرية (مثل الضوء والإلكترونات) بخصائص جسيمية وموجية معاً.

ثوابت أساسية (Fundamental Constants): ثوابت الفيزياء الأساسية مثل سرعة الضوء وثابت بلانك وثابت نيوتن.

جبر مجرّد (Abstract Algebra): فرع من الرياضيات يدرس البنى الجبرية مثل الزمر والحلقات والحقول والفضاءات الشعاعية... إلخ.

جداء ديكارتي (Cartesian Product): الجداء الديكارتي لمجموعتين هو مجموعة الثنائيات التي ينتمي مسقطاها الأول والثاني إلى المجموعة الأولى والثانية على الترتيب: $A \times B = \{(x, y): x \in A, y \in B\}$.

جزيء (Molecule): البنية الأصغر للمواد الكيميائية، تتألّف من ذرّة واحدة أو أكثر ترتبط عبر الإلكترونات.

جسيم أوّلي (Elementary Particle): جسيم لا بنيةَ داخلية له، ويُعتبر بذلك من البنى الأساسية للمادة، مثل الكواركات.

جسيم قائم بالوساطة (وسيط/ شفيع/ سفير) (Intermediate Particle): حامل القوى أو الجسيم الرسول، فالغليّونات والفوتونات وبوزونات W, Z تحمل على الترتيب القوى الشديدة والكهرمغناطيسية والضعيفة.

جسيمات افتراضية (اعتبارية) (Virtual Particles): جسيمات تنبثق من الخلاء على نحو لحظي حاملة طاقة مستعارة تتوافق مع مبدأ الارتياب، لكنها سرعان ما تفني بعضها فتتلاشى معيدةً طاقتها المستعارة.

جملة مقارنة (مراقبة)/ مرجع/ مَعْلَم (Reference Frame): محاور إحداثيات لمرجع ما تحدِّد بشكل وحيد موضع كلّ نقطة فيه.

حادثة (Event): مفهوم فيزيائي يتعيَّن في زمكان النسبية الخاصّة بإعطاء الموضع المكاني واللحظة الزمانية.

حالة أرضية (أساسية) (Ground State): حالة كمومية ذاتيّة لمؤثّر الطاقة تكون فيها قيمة الطاقة أصغرية.

حالة ذاتية/ قيمة ذاتية (Eigen State/ Eigen Value): الحالة الذاتية لمؤثّر كمومي هي حالة غير معدومة تتميَّز بأنه إذا طُبِّق عليها المؤثّر فإنّ الناتج هو الحالة الأصلية مضروبةً بالقيمة الذاتية.

حالة متماسكة (Coherent State): تعبير يعني أصلاً في ميكانيك الكمّ حالة كمومية خاصّة لجسيم ضمن كمونٍ تربيعي (هزّاز توافقي)؛ حيث يشابه سلوكُها سلوكَ هزّازٍ كلاسيكي مع تحقيقها قيمة أصغرية للارتياب في الاندفاع والموضع. وفي البصريات الكمومية يُوصف ضوء الليزر المثالي من خلال حالة متماسكة.

حالة مقيّدة (Bound State): تعبير يُقصد به في ميكانيك الكمّ حالةً لجسيمَين أو أكثر تكون فيها طاقة التآثر سالبة القيمة، وبالتالي لا يمكن فصل هذه الجسيمات إلاّ إذا تمّ تزويد الطاقة من الخارج.

حجرة غيمية (Cloud chamber): وعاء مفرط الإشباع ببخار الماء يُعرَف كذلك باسم (حجرة ويلسون)، وهي تُستخدَم للكشف عن جسيمات مشحونة مؤيِّنة ـ مثل أشعة بيتا وألفا ـ عندما تؤدي إلى تَأيُّن بخار الحجرة، حيث تسلك الإيونات الناتجة مسلكَ مراكز تكثيف تتشكّل حولها قطيرات مرئية تساعد على كشف مسار الجسيمات المشحونة.

حدّ (نهاية) تشاندراسِخار (Chandrasekar Limit): القيمة الأعظمية لكتلة «غير دوّارة» تتألّف من نوى مغمورة ضمن غاز من الإلكترونات تستطيع من خلال ضغط «الانحلال (Degeneracy) الإلكتروني» ـ الناجم بدوره عن مبدأ الاستبعاد وعدم إمكانية توضّع إلكترونَين في حالة كمومية واحدة ـ مواجهة ومقاومة قوة الجذب الثقالية التي تسبّب انهيارها. تساوي تقريباً 1,4 مرّة من كتلة الشمس، ويمكن للنجوم ذات الكتلة الأصغر منها أن تبقى كأقزام بيضاء عند انتهاء وقودها النووي.

حضيض شمسي (Perihelion): تعبير يعني في الميكانيك

السماوي الوضع الذي تكون فيه الشمس أقرب ما يمكن إلى شيء معيّن.

حقل (Field): هو - من منظور عياني - الوسيلة التي تنقل بها قوة ما تأثيرها؛ ويتمثّل بمجموعة أرقام خاصة بكل نقطة في الزمكان تعكس شدة القوة واتجاهها في تلك النقطة.

حقل هيغز (Higgs Field): جسيم سلّمي (بوزون بتدويم - سبين 0) أوّليّ يتنبّأ بوجوده النموذج المعياري.

حلزونية (لولبية) (Helicity): سمة لفيزياء الجسيمات الأولية تميّز الكفّ اليمنى عن الكفّ اليسرى (أي تميّز الحركة وفقاً لقاعدة اليد اليمنى - حيث اندفاع الجسيم وتدويمه مماثلان للإبهام والتفاف الأصابع حوله في اليد اليمنى - عن الحركة وفقاً لليد اليسرى)

حمل حراري (Convection): إحدى الطرق التي يتمّ فيها النقل الحراري ونقل الكتلة، ويحدث عادةً بواسطة حركة السوائل.

خطوط طيفية (Spectral Lines): خطوط معتمة أو ساطعة ضمن طيف لوني (تواتري) مستمرّ تنجم عن نقص أو زيادة فوتونات بتواترات موافقة لها.

خلاء/ فراغ (خواء)/ طاقة الفراغ/ حالة الفراغ (Vacuum/ Vacuum Energy/ Vacuum State): كلاسيكيّاً منطقة من المكان لا مادّة فيها. أمّا في نظرية الحقل الكمومي فإنّ الحالة الكمومية للفراغ تعجّ بتراوحاتٍ كمومية وجسيمات افتراضية تُخلَق وتفنى، وبالتالي فلها طاقة حتى في غياب أيّ مادة فيها.

درجة حرارة (نقطة) كوري ((Curie Temperature (Point)): هي درجة الحرارة التي تفقد المادة ذات المغنطة الحديدية خاصّيَتها هذه عندما تتجاوزها، فتصبح حينها مادة بمغنطة مسايرة.

دفع (Impulse): تكامل القوة بالنسبة إلى الزمن.

دفق/ نفث/ سيل دفق نفثي (Jet): مخروطٌ ضيّق من

الهادرونات مع جسيمات أخرى ينشأ عند تحوّل الكوارك والغليّون ـ عبر اتّحاده مع كواركات وغليّونات أخرى ـ إلى هادرونات في تجارب صدم الجسيمات الأوّليّة ذات الطاقات العالية.

دون ذرّية (Subatomic): خاصّة بجسيم أوّليّ أو مركّب أصغر من الذرّة.

ديناميك كهربائي (الإلكتروديناميك)، الكهرمغناطيسية (Electrodynamics, Electromagnetism): توحيد ظواهر الكهرباء والمغناطيسية في قوة واحدة هي القوة الكهرمغناطيسية (ويتضمّن ذلك النسبية الخاصّة).

ذاتيّ/ باطنيّ/ داخليّ المنشأ (Intrinsic): سمة صميمية من جوهر الشيء.

ذرّة (Atom): الوحدة البنيوية الأساسية للمادة، تتكون من نواة تحتوي بروتونات ونترونات وتحيط بها إلكترونات.

ذروة/ قمة/ عُرف منتصب (Crest): ذروة موجة ما هي أعلى مكان تصله.

رأس/ زاوية (Vertex): تعبير يعني في فيزياء الجسيمات نقطة التفاعل التي تتصادم فيها الجسيمات.

رتبة العِظَم (العظامة) (Order of Magnitude): رتبة عظم 10^{-3} هي 5، بينما رتبة عظم 10^{-3} هي 3-.

رنين (طنين) (Resonance): إحدى حالات الاهتزاز الطبيعية لجملة فيزيائية. وعادةً تميل المنظومة إلى الاهتزاز بسعاتٍ أعظمية عند قيم محدّدة للتواتر توافق وضعَ الرنين.

زاوية المزج (الخلط) الضعيف (Weak Mixing Angle): زاوية θ_W تربط بين كتلتَي بوزونَي W وZ: $\sin^2 \theta_W \approx 0.2$، وتعتمد قيمتها على مقدار مقاس الطاقة الذي نقيسها عنده.

زمر أحاديّة/ زمر أحادية خاصّة (Unitary Groups, Special

(Unitary Groups**)**: زمر المصفوفات الأحادية التي يكون مرافقها العقدي مقلوباً لها: $MM^{\dagger} = 1_n$، فإذا كان معيّنها مساوياً للواحد دُعيت خاصّة.

زمر متعامدة/ زمر متعامدة خاصّة (Orthogonal Groups/ Special Orthogonal Groups): زمر المصفوفات المتعامدة التي يكون منقولها مقلوباً لها: $MM^T = 1_n$، فإذا كان معيّنها مساوياً للواحد دُعيت خاصّة.

زمرة بسيطة (Simple Group): زمرة لا تحتوي على أيّ زمر جزئية «ناظمية» (Normal) غير تافهة، وقد تمّ إنجاز تصنيف الزمر البسيطة المنتهية تماماً عام 1982.

زمرة الجداء (Product Group): زمرة تنشأ من خلال تزويد الجداء الديكارتي لزمرتَين بعملية داخلية حيث مسقطا ناتج العملية بين ثنائيّتَين هما ناتجا عمليّتَي الزمرتَين الأصليّتَين كلٌّ على المسقطَين الموافقَين.

زمرة جزئية (Subgroup): مجموعة جزئية في زمرة تكون هي أيضاً زمرة تحت نفس العملية الثنائية.

زمرة لي/ جبر لي (Lie Group/ Lie Algebra): زمرة جبرية مزوّدة ببنية تحليليّة لمتنوّع تفاضلي، ويُسمّى الفضاءُ المماس لها عند العنصر الحيادي بجبرها.

زمرة منجدلة (الزمرة عقدية الخطّ) (Symplectic Group): زمرة يتعرّف جبر لي الموافق لها بالمصفوفات المربّعة A من رتبة 2n والتي تحقّق $\Omega A + A^T \Omega = 0$، حيث $\Omega = \begin{pmatrix} 0 & I_n \end{pmatrix}$.

زمرة وحشية (مسخية) (Monster Group): زمرة تناظر متقطّع بسيطة منتهية يبلغ عدد عناصرها تقريباً 8×10^{53}.

زمن صرف (Proper Time): هو ـ في النسبية الخاصّة ـ الزمن الفاصل بين حادثتَين واقعتَين في نفس مكان الميقاتية التي تقيس هذا الفارق.

زوجية (شفعية) (Parity): خاصّية بقاء المنظومة نفسها أو عدمه عندما تُقلب اتجاهات محاور الإحداثيات، وتقنياً يُعبَّر عنها بالقيمة الذاتية للمنظومة (+1) عند تطبيق تحويل انعكاسي عليها. مثلاً: إذا كانت المنظومة جسيماً يصفه تابع موجي زوجي $\psi(r) = \psi(-r)$، كانت زوجيته +1.

سائل فائق/ سيولة فائقة (Superfluid/ Superfluidity): قدرة بعض المواد (السوائل الفائقة) على الجريان والسيلان من دون أيّ احتكاك حيث تصبح لزوجتها معدومة.

سرعة زاوية (Angular Velocity): السرعة الزاويّة ω تساوي : $\omega = 2\pi f$ حيث f التواتر.

سعة (Amplitude): سعة تابع موجي هي مقدار الفارق بين ذروته وغوره مقسوماً على اثنين.

سعة كمومية (Quantum Amplitude): مفهوم فيزيائي يعبّر مربّعُ طويلته عن قيمة احتمال أو كثافة احتمالية.

سعة، طويلة (نظيم) (Magnitude): عدد موجب يُقرَن بكمّية باعتباره قيمتها المطلقة أو طويلتها.

سهم الزمن (Arrow of Time): يعبّر سهم الزمن الترموديناميكي عن اتّجاه الزمن الذي تزداد فيه الأنتروبية، بينما يعبّر سهم الزمن الكوني عن اتّجاه الزمن الذي يتمدّد وفقه الكون ويزداد اتّساعاً، ويعبّر سهم الزمن الخاصّ بالتفاعلات الضعيفة لفيزياء الجسيمات عن اتّجاه الزمن الذي تمّ وفقه خلق المادة وغلبتها على المادة المضادّة، أمّا سهم الزمن في ميكانيك الكمّ فهو الاتّجاه الزمني الذي تتمّ وفقه عملية القياس. وهناك بعض النماذج التي تربط منطقياً أو رياضياتياً بين هذه المفاهيم المتعدّدة المتباينة ظاهرياً.

سيكلوترون (مسرِّع الشحنات) (Cyclotron): نوعٌ من مسرّعات

الجسيمات يستخدم التيّار المتناوب ذا التواتر العالي من أجل تسريع الجسيمات المشحونة.

سيكلوترون مواقِت (Synchrocyclotron): سيكلوترون يتغيّر فيه تواتر الحقل الكهربائي المطبَّق للتعويض عن الزيادة في الكتلة عندما تقترب سرعة الجسيم المسرَّع من سرعة الضوء.

شاردة/ متأيّن (متشرّد) (Ion/ Ionized): ذرّة فقدت أو كسبت بعض الإلكترونات فتأيّنت.

شبكة (Lattice): تعبير يعني عادةً في فيزياء المادة الكثيفة توزّع الذرّات في البلّورة على شكل شبكة. وتمثّل عموماً الطرفَ المقابلَ لصفة الاستمرار.

شحنة لونية (Color Charge): خاصيّة للكواركات والغليّونات تميّز مدى خضوعها للتآثرات بالقوى الشديدة ضمن نظرية الكروموديناميك الكمومي.

شذوذ/ أمر غير طبيعي (Anomaly): زوالُ تناظرٍ تتمتّع به نظريةٌ كلاسيكيةٌ عندما يتمّ تكميمها.

شريك فائق (Superpartner): أحد طرفي الزوج اللذين يقرن بينهما **التناظر الفائق**، ويختلف تدويمه (سبينه) عن شريكه بمقدار $\frac{1}{2}$ وحدة.

شوّاش/ فوضى (Chaos): تعبير يُقصَد به في الفيزياء الكلاسيكية «الحتمية» وضعاً لمنظومةٍ ما يعتمد بشكل شديد الحساسية على شروطها الابتدائية، بحيث يقتضي أيّ تبدّل لهذه الشروط ـ ولو كان ضئيلاً ـ تغييرات كبيرة في حركة المنظومة، وبالتالي لا ينجم «الارتياب» في الحركة عن اتّصاف القوانين بـ «عدم الحتمية» بل عن عدم المعرفة الكاملة والدقيقة للشروط الابتدائية.

صفر مطلق (Absolute Zero): درجة الحرارة الأدنى التي تنعدم عندها الحركة الجزيئية، وتساوي ـ 273 درجة سلزيوس، أو نقطة البدء (الصفر) على سلم كلفن.

ضبط (توليف) دقيق (Fine Tuning): وضعٌ نحتاج فيه إلى ضبط بارامترات النظرية بشكلٍ دقيقٍ جداً من أجل الاتّفاق مع التجربة.

ضدّ أزرق (ضدّ أحمر، ضدّ أصفر) (Antiblue) (Antired, Antiyellow): الشحنة اللونية التي يمتلكها الكوارك المضادّ لكوارك ذي شحنة لونية معيّنة، مثلاً إذا كان الكوارك أحمر الشحنة اللونية تكون شحنة الكوارك المضادّ هي ضدّ أحمر.

ضوء الليزر (Laser): ضوء مضخَّم بطريقة الإصدار المحثوث للإشعاع، وعادةً يكون متماسكاً مكانياً حيث تكون حزمته ضيّقة جداً، ومتماسكاً ضوئياً حيث له تواتر وطور وحيدان لا يتغيّران كيفياً.

ضوء تحت الأحمر (الأشعة تحت الحمراء) (Infrared Light): إشعاع كهرمغناطيسي بطول موجي أكبر منه في حالة الضوء المرئي ولكن أصغر منه في حالة الأمواج المكروية.

ضوء كمومي (بصريات كمومية) (Quantum Optics): تطبيق ميكانيك الكمّ على الضوء وتفاعلاته.

ضوئيات/ بصريّات (Optics): علم دراسة سلوك وخصائص الضوء وتفاعله مع المادة.

طاقة (Energy): المقدرة على خلق الظواهر وتغيير حالة المنظومات الفيزيائية، وهناك أشكال كثيرة لها مثل: الحركية، الكامنة الثقالية والكهربائية، كمية الحرارة... إلخ.

طاقة حيوية (Bioenergy): طاقة متجدّدة المصدر تنشأ من مواد ذات أصول بيولوجية، وأهم أشكالها الوقود البيولوجي.

طاقة كامنة (Potential Energy): يساوي فرقُ الطاقة الكامنة بين نقطتَين العملَ المبذولَ عند الانتقال بينهما.

طاقة نقطة الصفر (Zero Point Energy): طاقة الحالة الأرضية في ميكانيك الكمّ، وطاقة الفراغ في نظرية الحقل الكمومي. انظر Ground state, Vacuum State.

طوبولوجيا (Topology): فرعٌ من الرياضيات يعنى بتصنيف الأشكال في زمر حيث يمكن تغيير الأشكال في أيٍّ منها من واحد إلى آخر من دون تمزيق بنيته بأي شكل كان.

طور/ تبدّل الطور (تحوّل طوري) (Phase/ Phase Transition): وصفٌ لحالة جملة فيزيائية مادية، مثاله الطور الصلب والسائل والغازي. وهو عموماً أحد الأوصاف الممكنة لمنظومة فيزيائية بدلالة السمات التي تتوقف عليها (مثل درجة الحرارة)، ويعني تبّدلُه تغيّرَ حالةِ جملة فيزيائية من طور إلى آخر.

طول الموجة (طول موجي) (Wave Length): المسافة بين ذروتين (أو قعرَين) موجيّتين متتاليين.

عائلات/ فصائل (Families): ترتيب لجسيمات المادة في ثلاث زمر أو مجموعات، تُعرف كل واحدة منها بالعائلة أو الفصيلة (الذرّية). تختلف جسيمات كل عائلة عن جسيمات العائلة التي سبقتها بأنها أثقل منها، إلاّ أنَّ كلاً منها يحمل نفس شحنات القوى الكهربائية والنووية التي يمتلكها مقابلاه في العائلتين الأخريين.

عامِل لورنتز (Lorentz Factor): عامل يظهر في صيغ تحويلات لورنتز: $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$..

عدد اللفّات/ عدد التفافي (Winding Number): عدد المرات التي يلتفّ فيها منحنٍ مغلق حول نقطة.

عدد أوّلي (Prime Number): عدد صحيح لا يقبل القسمة إلاّ على واحد وعلى نفسه.

عدد تخيّلي (Imaginary Number): عدد من الشكل bi حيث b عدد حقيقي و$i^2 = -1$.

عدد ذرّي (Atomic Number): عدد البروتونات في نواة الذرّة.

عدد صحيح (Integer): عدد يمكن التعبير عنه كمجموع أو طرح عددَين طبيعيَّين.

عدد موجي (Wave Number): عدد الموجات في واحدة الطول.

عرْضي/ عرضاني (Transverse): صفة مثالها النموذجي الضوء الذي هو موجة عرضية لأنّ اهتزازات حقله الكهرمغناطيسي عمودية على اتّجاه انتشاره.

عروة/ حلقة (Loop): تعبير يعني في نظرية البيان (Graph theory) أيّ منحنٍ يصل بين رأس ونفسه.

عزم العطالة (Moment of inertia): مقاومة الجسم للتغيّر في حركته الدورانية حول محور، ويساوي التكامل $\int_V x^2 \rho dV$ حيث ρ كثافة الجسم وx البعد عن محور الدوران.

عزم مغناطيسي غير سويّ (غير طبيعي/ شاذّ) (Anomalous Magnetic Moment): مساهمة ميكانيك الكمّ من خلال العروات الموجودة ضمن مخطّطات فاينمان في العزم المغناطيسي للجسيم (الذي يعبّر بدوره عن «قوة» الخصائص المغناطيسية للجسيم).

عطالة (Inertia): مقاومة الشيء لتغيير حالة حركته.

عقدة (Node): نقطة تبلغ عندها الموجة المستقرّة قيمةً معدومة أو أصغرية، مثل نهايتَي وتر القيثارة.

علم الفلك (Astronomy): علم دراسة الأجرام السماوية مثل النجوم والمجرّات والكواكب (تشكّلها، فيزيائيتها وكيميائيتها وحركتها. . . إلخ) وكذلك نشأة الكون وتطوّره.

علم المثلّثات (Trigonometry): فرع يعنى بدراسة التوابع الجيبية وتطبيقاتها لتحديد زوايا وأضلاع المثلثات.

عمر نصف الحياة (نصف العمر الإشعاعي) (Half-Life): الزمن اللازم لانخفاض مقدارٍ فيزيائي يتناقص أسيّاً إلى نصف قيمته الابتدائية.

عملية التبديل (تبديل الترتيب) (Permutation): رياضياتياً هو تقابل من مجموعة منتهية إليها هي نفسها.

عملية تناظرية/ تحويل تناظري (Symmetry Operation, Symmetry Transformation): نقول عن منظومة إنها متناظرة بالنسبة إلى تحويلٍ (أو عملية) تناظري إذا بقيت نفسها قبل وبعد تطبيق هذا التحويل عليها.

عناصر الأتربة النادرة (عناصر أرضية نادرة) (Rare-Earth Elements): 17 عنصراً كيميائياص، هي السكانديوم والأتريوم وفئة اللانثانايدات.

عناقيد/ تجمّعات (Clusters): تعني في الفيزياء مجموعةً من الذرّات والجزيئات، أمّا في الفلك فتعني تجمّعات من النجوم أو المجرّات.

عنصر حيادي (عملية حيادية) (Identity Element (Operation)): عنصر في مجموعة مزوّدة بعملية داخلية، بحيث يكون ناتج تطبيق العملية عليه وعلى أيّ عنصر آخر هو نفس الأخير.

عياني/ جهري (Macroscopic): كبير أو من الكبر بحيث يُرى بالعين المجردة، ويوافق مقاييس نلقاها في حياتنا اليومية أو أكبر. ويمكن اعتباره معاكساً لصفة المجهري.

عيّنة اهتزاز (ذبذبة) (Vibration Pattern): وصفٌ لاهتزازٍ (وتري مثلاً) يتضمن عدد الذرى والقيعان المتشكّلة وسعاتها.

غرافيتون (جُذبون) (Graviton): الرزمة الأصغر لحقل قوة الثقالة، وهو الجسيم الرسول لهذه القوة.

غلافٌ مملوء (مُغلَق)/ قشرة مغلقة (Closed shell): تعبيرٌ يُقصَد به حالة مجموعة إلكترونات في الذرة لا تساهم في التفاعلات الكيميائية، وتأتي ضمن أزواج تملأ مداراً طاقياً معيّناً. لا تحتوي الغازات الخاملة إلاّ على أغلفة مملوءة بشكلٍ كامل، فيكون التشكيل الإلكتروني لغاز النيون مثلاً: $1s^2\ 2s^2\ 2p^6$.

غليّون (غريون) (Gluon): الرزمة الأصغر لحقل القوة الشديدة، وهو الجسيم الرسول لهذه القوة.

غور/ منخفض (Trough): غور موجة ما هي أخفض مكان تصله.

غياب التناظر/ لاتناظر (Asymmetry): عدم وجود التناظر، فمثلاً غياب التناظر في الباريونات يعني غلبة وجودها على شكل مادّة اعتيادية مقارنةً بالوجود على شكل مادّة مضادّة في الكون.

فاصل (مجال) لامتغيّر (Invariant Interval): تعبير يدلّ في النسبية الخاصة على «المسافة المطلقة» بين حادثتَين التي لا تتغيّر من مراقبٍ إلى آخر: $\Delta L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2 \Delta t^2}$.

فرميون (Fermion): جسيم مادي ـ أوّلي أو مركّب ـ ذو تدويم (سبين) مقداره نصف عدد صحيح فردي.

فلك التدوير (Epicycle): نموذج هندسي في نظرية بطليموس لتفسير التغيُّرات الملاحَظة في سرعات واتّجاهات القمر والشمس والكواكب، حيث تتحرّك الأجرام في دوائر تدور مراكزها بدورها في دوائر أكبر.

فناء (انعدام/ زوال/ إفناء) (Annihilation): حالة تحدث عندما يتصادم جسيمٌ مع مضادّه، حيث يفنيان بعضهما بعضاً ويتحوّل اندفاعهما وطاقتهما إلى جسيماتٍ جديدة.

فوتون/ فوتينو (Photon/ Photino): الفوتون هو الرزمة الأصغر لحقل القوة الكهرمغناطيسية، وهو الجسيم الرسول لهذه القوة، ويمثّل أصغر حبّة ضوء. أمّا الفوتينو فهو شريكه الفائق في سياق نظرية التناظر الفائق.

فوضى/ تشويش (Disorder): تعبير له صلة بمفهوم الأنتروبية، حيث تتميّز حالةُ الفوضى وعدم الانتظام بأنتروبية أكبر من الحالة المرتّبة.

فوق البنفسجي (Ultraviolet): إشعاع كهرمغناطيسي بطول موجي أصغر منه في حالة الضوء المرئي ولكن أكبر منه في حالة الأشعة السينية.

في الأصل كانت هذه الزمرة تُسمّى بـ الزمرة عقدية الخطّ (Line Complex Group)، ولكن هيرمان وايل (Hermann Weyl) أعطاها هذا الاسم مترجماً حرفيّاً التركيب Sym-Plectos اليوناني الذي يعني «المنضفر معاً» (تذكّر أنّ كلمة المعقّد (Co-mplex) أصلها باللاتيني كذلك «المنضفر معاً»).

فئة/ طائفة (Category): تعبير يعني في الرياضيات مجموعةً من الأشياء مرتبطةً بعضها ببعض عبر مجموعةٍ من الأسهم بخصائص معيّنة.

فيزياء تقليدية (كلاسيكية) (Classical Physics): الفيزياء القائمة على المبادئ التي تمّ تطويرها قبل ظهور ميكانيك الكمّ، وهي تشمل النسبية الخاصّة، ويضمّ بعضهم النسبيةَ العامة أيضاً إليها.

فيزياء فلكية (Astrophysics): فرع من علم الفلك يهتمّ بالخصائص الفيزيائية للأشياء التي يدرسها هذا العلم، وهي تشمل الخواصّ الفيزيائية (السطوع والكثافة ودرجة الحرارة والتركيب الكيميائي. . . إلخ) للأجرام السماوية وللوسط الذي يوجد بينها.

قانون مربَّع المقلوب (Inverse-Square Law): أيّ قانون يقول بتناسب كميّة فيزيائية عكساً مع مربّع المسافة الفاصلة بين المكان الذي نقيس فيه هذه الكميّة وبين منبعها، مثل قانون نيوتن الثقالي.

قانون مصونية (Conservation Law): قانون فيزيائي ينصّ على أنّ كميةً مقيسةً لمنظومة فيزيائية تبقى صامدة (لا متغيّرة) رغم خضوع المنظومة لتحويلٍ ما.

قَرْن/ اقتران/ ارتباط/ ربط (Coupling): يعبّر الاقتران بين كائنَين فيزيائيَّين عن وجود تفاعلٍ وتآثر بينهما.

قطب (Pole): للمغناطيس قطبان شمالي وجنوبي.

قطع ـ زائدي (Hyperbolic): صفة لكل ما له علاقة بالقطع الزائد (يمكن كتابة معادلته بالشكل: $\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}=1$).

قطع ـ مكافئي (Parabolic): صفة لكل ما له علاقة بالقطع المكافئ (يمكن كتابة معادلته بالشكل: $y=ax^2$).

قطع ـ ناقصيّ (Elliptic): صفة لكل ما له علاقة بالقطع الناقص (يمكن كتابة معادلته بالشكل: $\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1$).

قلب الزمن (عكس الزمن)/ حركة مقلوبة (أو معكوسة) في الزمن (حركة بزمنٍ مقلوب ومعكوس) (Time Reversal/ Time-Reversed Motion): دراسة ظاهرة أو قانون ما عندما نعود إلى الوراء في الزمن.

قلْب/ عكس (Reversal): الضرب بـ 1-.

قوة رد فعل/ قوة ارتكاسية (Reactive Force): هي القوّة التي ينصّ على وجودها قانونُ نيوتن الثالث لكلّ قوّة فعل بحيث تساويها في الشدّة وتعاكسها في الاتّجاه.

قوّة مدّ ـ جزريّة (Tidal Force): أثر جانبي لقوة الثقالة ينشأ عن عدم انتظام تأثير هذه القوة ضمن جسمٍ له امتداد كبير، وهي مسؤولة عن المدّ والجزر.

قوى شديدة (Strong Forces): أقوى القوى الأساسية الأربع، وهي المسؤولة عن احتجاز الكواركات داخل البروتونات والنترونات، وعن تماسك البروتونات والنترونات في نوى الذرات.

قوى ضعيفة (Weak Forces): واحدة من القوى الأساسية الأربع تُعرف لدورها في عمليات التحلّل الإشعاعي، وهي تنجم عن تناظر معياري هو المعيار الضعيف الذي يمزج بين النكهات.

قيمة توقّع الفراغ (Vacuum Expectation Value): عندما تكون نظريةُ الاضطرابات صالحةً تكون حالةُ الفراغ في نظرية الحقل مماثلةً

للحالة الأرضية في ميكانيك الكمّ، ويكون لأيّ مؤثّر قيمة توقّع معدومة فيها. أمّا عندما تتوقّف صلاحية نظرية الاضطرابات فيمكن لبعض المؤثّرات أن يصير لها قيم توقّع غير معدومة في الفراغ، مثل حقل الهيغز الذي يكتسب مثل هذه القيمة بسبب كسر التناظر الآني.

كاشف/ حسّاس (Detector): جهاز يقيس كمّيةً فيزيائية ويحوّلها إلى إشارةٍ نستطيع قراءتها.

كثافة حرجة **(Critical Density)**: هي القيمة التي إذا اختلفت الكثافة الطاقية في الكون عنها، فإنه سيستمرّ للأبد في التمدّد والاتّساع في حال نقصانها وسيتحوَّل تمدّده إلى انكماش في حال زيادتها.

كروموديناميك كمومي (ديناميكا لونية كمومية) (Quantum Chromodynamics) (QCD): نظرية حقل كمومي نسبوية للقوة الشديدة وللكواركات، تتضمن النسبية الخاصة، وتتآثر الكواركات التي تحمل شحنات لونية فيها من خلال تبادلها لغليّونات تحمل بدورها هذه الشحناتِ.

كسر (فصم، تحطيم) التناظر (Symmetry Breaking): اختزال مقدار تناظر جملة ما يرتبط غالباً بتبدّل طورها.

كمون سلّمي (Scalar Potential): حقل سلّمي لطاقة كامنة V، أي تطبيق من منطقة من الفراغ إلى مجموعة الأعداد الحقيقية، وتساوي القوّة عكس تدرّجه.

كمون شعاعي (Vector Potential): تعبير يعني حقلاً شعاعياً A دوّاره هو الحقل المغناطيسي: $B = \Delta \times A$.

كهرضعيف (Electroweak): اتّحاد القوّتَين الكهرمغناطيسية والضعيفة في الحقل الكهرضعيف.

كوارك ذروي (Top Quark): كوارك من الذرّية الثالثة، شحنته +2/3 e، وكتلته حوالي 170 GeV.

كوارك سفلي (Down Quark): كوارك من الذرّيّة الأولى، شحنته ‎-1/3 e‎، وكتلته حوالي 4 MeV.

كوارك علوي (Up Quark): كوارك من الذرّيّة الأولى، شحنته ‎+2/3 e‎، وكتلته بين 1.5 MeV و4 MeV.

كوارك غريب (Strange Quark): كوارك من الذرّيّة الثانية، شحنته ‎-1/3 e‎، وكتلته من رتبة 100 MeV.

كوارك فاتِن (Charm Quark): كوارك من الذرّيّة الثانية، شحنته 2/3 e، وكتلته حوالي 1.5 GeV.

كوارك قعري (جميل) (Bottom (Beauty) Quark): كوارك من الذرّيّة الثالثة، شحنته ‎-1/3 e‎، وكتلته حوالي4200 MeV.

كوارك مضادّ (Antiquark): الجسيم المضادّ للكوارك.

كوارك/ لون كواركي (شحنة لونية) (Quark/ Quark Color): جسيم يعمل بتأثير القوة الشديدة، وهو على ستة أشكال (علوي، سفلي، فاتن، غريب، ذروي، قعري) وثلاثة ألوان (أحمر، أخضر، أزرق). تعبّر الألوان عن شحنة مرتبطة بتناظرٍ معياريّ موضعي لزمرة SU(3).

كوانتا/ كمّات (كموم) (Quanta/ Quantum Mechanics): أصغر وحدة فيزيائية يمكن إدراكها عند تقسيم شيء ما تبعاً لقوانين ميكانيك الكمّ؛ فالفوتونات مثلاً هي كوانتا (أو كموم) الحقل الكهرمغناطيسي. أمّا ميكانيك الكمّ فهو إطار للقوانين يحكم العالَم الذي تغدو سماته غير المألوفة ـ مثل الارتياب والتأرجحات الكمومية وثنوية الموجةالجسيم ـ أكثر وضوحاً في المقاييس المجهرية للذرات والجسيمات دون النووية.

كوكب خارج منظومتنا الشمسية (Exoplanet): كوكب يدور حول نجم غير الشمس.

كونٌ متسارع (Accelerating Universe): تعبير يستند إلى الملاحظات التي بيَّنت منذ عام 1998 أنّ تمدّد الكون واتّساعه يحدثان على نحوٍ متسارع.

كويكب (Asteroid): جسم صغير نسبياً بالمقارنة مع الكواكب العادية يطوف حول الشمس ويمكن اعتباره كوكباً صغيراً.

لامتناه في الصغر/ فائق الضآلة (Infinitesimal): هي عادةً صفة لشيءٍ ينتهي إلى الصفر.

لاانطباقية (Chirality): سمة لفيزياء الجسيمات الأولية تميّز - مثل اللولبية (الحلزونية helicity) - الكفّ اليمنى عن الكفّ اليسرى، لكن تقنياً يُدعى الجسيم لاانطباقياً إذا كان يتحوّل بالنسبة إلى زمرة بوانكاريه (تحويلات لورنتز مجموعاً لها الانسحابات الزمنية والمكانية) ضمن تمثيل «يميني» أو «يساري». وهناك بعض التمثيلات - مثل تمثيل ديراك - تحتوي على مركّبات لا انطباقية يمينياً ومركّبات أخرى يسارياً، وفي هذه الحالة يمكن تعريف مؤثّر إسقاط (بواسطة مصفوفة غاما خاصّة) يُبقي فقط على أحد النوعَين من المركّبات. وجدير بالذكر أنّ اللاانطباقية يمكن تقريبها إلى اللولبية عندما تكون كتلة الجسيم صغيرة.

لاتغيّر (صمود) غاليليّ/ نسبيّة غاليليو /Galilean Invariance) Galilean Relativity): بقاء القوانين الفيزيائية نفسها في جميع المراجع العطالية المرتبطة مع بعضها عبر تحويلات غاليله.

لبتونات (Leptons): فرميونات أوّليّة بتدويم (سبين) - 1/2، تخضع للقوى الكهرمغناطيسية والضعيفة ولكنها لا تخضع للقوى الشديدة. وهي الإلكترونات والميونات والتاوات ونترينواتها.

مادة مضادّة (Antimatter): مادة تمتلك الخصائص الثقالية نفسها التي للمادة المألوفة، لكنها ذات شحنة كهربائية معاكسة وكذلك ذات شحنات قوى نووية معاكسة أيضاً.

مادة مظلمة (Dark Matter): مادة افتراضية (في علم الكونيات) نجهل تكوينها وتشكّل حوالي 22 في المئة من مجمل الطاقة في الكون، تمّ الاستدلال على وجودها بشكل غير مباشر من خلال آثارها الثقالية، وهي لا تُصدر أيّ إشعاع وبالتالي لا يمكننا رؤيتها.

مُبادِل (Commutator): مُبادل مؤثّرَين $\hat{A}$ و $\hat{B}$ في ميكانيك الكمّ هو: $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$.

مبدأ الارتياب (عدم اليقين) (Uncertainty Principle): مبدأ في إطار ميكانيك الكمّ كشفه هايزنبرغ، يقول إنّ هناك سمات للكون ـ مثل معرفة موضع جسيم ما وسرعته فيه ـ لا يمكن تحديدها بدقة بالغة معاً. تغدو بعض مظاهر الارتياب هذه في العالَم المجهري أشدّ حدّة وبروزاً كلما صغرت مقاييس الزمان والأبعاد التي ترى فيها هذه المظاهر، فالجسيمات والحقول تتأرجح وتقفز ما بين كلّ القيم الممكنة المتوافقة مع مبدأ الارتياب الكمومي، مما يجعل العالَم المجهري تلاطماً مسعوراً في بحر هائج من التأرجحات الكمومية.

مبدأ الاستبعاد (الإقصاء) لِـباولي (Pauli Exclusion Principle): هو عدم إمكانية فرميونَين متماثلَين أن يشغلا الحالةَ الكمومية نفسها في الوقت نفسه.

مبدأ التكافؤ (Equivalence Principle): مبدأ أساسي في نظرية النسبية العامة، يقول بعدم إمكانية التمييز ما بين حركة متسارعة وبين الخضوع لتأثير حقل ثقالي (في مناطق صغيرة بشكل كاف تخضع للملاحظة). وهو يعمّم مبدأ النسبية بإظهاره أنّ بوسع كلّ المراقبين ـ بغضّ النظر عن حالة حركتهم ـ الادّعاء بأنهم في حالة السكون، طالما أنهم يسلّمون بوجود حقل ثقالي مناسب.

متجانس (Homogeneous): صفة للزمكان تعبّر عن لاتغيّره عند تطبيق انسحابات مكانية وزمانية عليه.

متحرّك مع/ مشترك في الحركة (Comoving): صفة تعني في الحالة

العامة وجود صلة بالمرجع المرتبط (المشترك في الحركة) مع جسم ما في أثناء حركته بحيث يكون هذا الأخير ساكناً بالنسبة إليه. وتُعرَّف الإحداثيات المشتركة في الحركة الكونية (في علم الكونيات) بأنها الإحداثيات التي تُعطي مواضعَ ثابتة للمراقبين الذين يرون الكون متناظراً كروياً، ويُدعى هؤلاء بمراقبين مشاركين في حركة الكون التمدّدية.

متراجع (Retragrade): حركة كوكبية مخالفة لحركة الأجرام الأخرى.

متراصّ (Compact): المجموعات المتراصّة في الفضاء الإقليدي R^n هي المجموعات المغلقة والمحدودة.

متّصل/ مستمر (Continuum): خاصّيّة الاستمرار بشكلٍ عامّ هي خاصيّة طوبولوجية تعني عدم التقطّع .ويشير ذلك أحياناً إلى الخطّ المستقيم الممثِّل للأعداد الحقيقية.

متقاصِر (Geodesic): أقصر خطٍّ منحنٍ بين نقطتَين على سطح منحنٍ، ويقع بأكمله على هذا السطح.

متقدّمة (Prograde): حركة كوكبية «مباشرة» أي مماثلة لحركة الأجرام الأخرى.

متماكِب/ متجازِئ (إيزومير) (Isomer): جزيء له نفس الصيغة الإجمالية لجزيء آخر، لكنهما يختلفان في تسلسل الذرّات في البنية الداخلية أو حتى في اتّجاه الذرّات الفراغي.

متماكِب فراغي (إيزومير مجسّم) (Stereoisomer): متماكب لا يختلف عن متماكبه الآخر إلاّ في اتّجاه ذرّاتهما في الفراغ.

متناظر كروياً (Isotropic): متناظم في جميع المناحي والاتّجاهات.

مجرّة (Galaxy): منظومة فلكية هائلة الكتلة متماسكة ثقالياً، تتألّف من نجوم ووسط غازي وغباري (Dust) بينها بما في ذلك المادة المظلمة.

مجهري (Microscopic): صفة لشيءٍ صغير تتعذّر رؤيته بالعين المجرّدة، وفي علم الفيزياء الحديث يفسّر ميكانيك الكمّ العالَم المجهري.

مخطّطات العُرى (عروات) (Loop Diagrams): مخططات لفاينمان تحتوي على عرى تعبّر عن خلق وفناء جسيمات افتراضية في أثناء إجرائية ما.

مخطّطات فاينمان (Feynman Diagrams): تمثيل تخطيطي - في نظرية الحقل الكمومي - لمساهمةٍ معيَّنة في حساب سعة الانتقال من حالةٍ كمومية إلى حالة أخرى.

مذنّب (Comet): جسم سماوي يدور حول الشمس، ويتميّز بوجود ذيلٍ له عند اقترابه من الشمس.

مرافق عقدي (Complex Conjugate): مرافق العدد العقدي $z = a + ib$ هو $z = a - ib$.

مركّب (Component): مفهوم يمكن استيعابه من خلال مثال الشعاع ثلاثي الأبعاد الذي له ثلاث مركّبات وفق محاور الإحداثيات الثلاثة.

مركز ثقل/ مركز كتلة (Centre of Mass): مركز ثقل منظومة هو نقطةٌ تختزل في حركتها مجملَ الحركة الانسحابية للمنظومة كما لو كانت كتلة هذه الأخيرة كلّها متمركزةً فيها.

مسار (Trajectory): الطريق الذي يسلكه جسمٌ متحرّك في المكان.

مسألة التراتبية (Hierarchy Problem): مسألة استقرار كتلة جسيم هيغز ضمن المقياس الضعيف بالرغم من خضوع هذا الجسيم لتراوحاتٍ كمومية أكبر بكثير، وهي مرتبطة بمسألة كون الثقالة أضعف بكثير من القوى الأخرى.

مستسعرات حرارية فائقة (سوبرنوفا) (Supernova): انفجار

نجمي شديد السطوع يغمر غالباً المجرّةَ التي يوجد فيها النجم بكاملها، ويظلّ بريقه لأسابيع وأشهر قبل أن ينطفئ. يمكن للسوبرنوفا خلال هذه الفترة القصيرة أن تُشعّ طاقةً بمقدارٍ يكافئ ما تشعّه الشمس طيلة حياتها.

مستوى طاقي (Energy Level): إحدى القيم المتقطّعة التي تأخذها طاقةُ منظومة كمومية مقيّدة.

مسرّع جسيمات (Particle Accelerator): جهاز يدفع الجسيمات إلى ما يقارب سرعة الضوء، ويجعل بعضها يصطدم ببعضها الآخر بغية سبر بنية المادة.

مسلّمة/ فرضية (Axiom): موضوعة أوّليّة في المنطق لا يتمّ البرهان عليها، ويمكن اعتبارها كنقطة أوّليّة يستند إليها استنتاج بيانات منطقية أخرى.

مشتقّ (Derivative): مشتقّ التابع (في علم التحليل الرياضياتي) هو معدّل تغيّره بالنسبة إلى تغيّر متحوّلِه.

مصفوفة الانتقال (مصفوفة ـ T) (Transition Matrix) (T-Matrix): مصفوفة تتميَّز بأنّ مربّع طويلة أيّ عنصر مصفوفاتي منها بين حالتَين كموميّتَين يدلّ على احتمال الانتقال بينهما.

مضخِّم (Inflaton): الحقل المسؤول عن تضخّم الكون، ولا نعرف ماهيّته حتى اليوم.

معادلات الحركة (Equations of Motion): معادلات تصف حركة منظومة فيزيائية ما بالنسبة إلى الزمن، مثل قانون نيوتن الثاني ومعادلات لاغرانج.

معادلات ماكسويل (Maxwell's Equations): معادلات تفاضلية جزئية تعرّف نظرية توحّد ما بين الكهرباء والمغناطيسية قوامها مفهوم الحقل الكهرمغناطيسي، وضعها ماكسويل في ثمانينيات القرن التاسع عشر، وهي تُظهر أنّ الضوء مثال لموجة كهرمغناطيسية.

معادلة تفاضلية (Differential Equation): معادلة رياضياتية تتضمّن تابعاً مجهولاً لمتحوّل واحد أو أكثر ومشتقّاته.

مُعزِّز/ عملية الدعم (Boost): قوانين التحويل بين مراقبَين محاور إحداثيات مرجعَيهما متوازية ويتحرّك أحدهما بالنسبة إلى الآخر حركة منتظمة.

مغناطيس (حجر المغناطيس)/ حقل مغناطيسي (Magnet/ Magnetic Field): أيّ جسم يولّد حقلاً مغناطيسياً، وهو حقل شعاعي ينشأ عن تيّارات كهربائية (شحنات متحرّكة) ويصف التفاعلات في ما بينها.

مغناطيسية (المغنطة) (Magnetism): ظاهرة فيزيائية تتجاذب فيها أقطاب المغناطيس أو تتنافر.

مغنتيت (Magnetite): مادة معدنية خام تحتوي على أكسيد الحديد Fe_2O_3 ذات خواصّ مغنطيسية.

مغنطة (مغناطيسية) حديدية (Ferromagnetism): الآلية التي تمتلك بها بعض المواد (مثل الحديد) مغنطةً دائمة، فتتأثر بقوّة مع المغانط.

مغنطة (مغناطيسية) مسايرة (Paramagnetism): ظاهرة مغنطة تُلاحظ في موادّ تمتلك عزوماً مغناطيسية مجهرية دائمة لكنها لا تولّد حقلاً مغناطيسياً صافياً إلا بوجود حقل مغناطيسي خارجي، وتكون سماحيتها المغناطيسية النسبية أكبر من 1.

مغنطة (مغناطيسية) مغايرة (Diamagnetism): خاصّية لمادةٍ ما تعني أنه يُخلَق فيها ـ عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي عليها ـ حقلٌ مغناطيسيٌ معاكسٌ في جهته لجهة الحقل الخارجي.

مفارقة التوأمَين (Twin Paradox): تجربة فكرية في النسبية الخاصة يترك فيها شخصٌ أخاه التوأم على الأرض، وينطلق بسرعة قريبة من سرعة الضوء، ثم يعكس اتّجاهَه ويعود، ليجد ـ بسبب

ظاهرة تمدّد الأزمنة ـ أنّ أخاه قد شاخ كثيراً. تنتج المفارقة عن التساؤل عما إذا كان بالإمكان عكس الأدوار ليجدَ الأخُ الشيخ أخاه الشابَّ أكبرَ منه! والإجابة طبعاً بالنفي لأنّ مرجعَي الأخوَين ليسا متناظرَين، ومرجعُ الأخ الشيخ هو وحده المرجع العطالي.

مفعول كهرضوئي (Photoelectric Effect): ظاهرة تُقتلع فيها الإلكترونات من سطح معدني عند تسليط ضوء عليه.

مقدار الملحوظ/ الراصد (المراقب) (Observable/ Observer): الراصد هو شخص افتراضي (أو قطعة من جهاز افتراضي غالباً) يقيس خصائص جملة فيزيائية، فتُدعى بالملحوظات.

مِقراب/ تلسكوب (Telescope): أداة لرؤية أجسام بعيدة من خلال استلام إشعاعها الكهرمغناطيسي.

مقياس (مقاس) فيرمي (Fermi Scale): ثابت فيزيائي يُرمَز له بـ G_F، وهو يمثّل واحدة الكتل الأساسية التي تحدّد المقياس المناسب للقوى الضعيفة، ويساوي تقريبا 175 GeV.

مقياس التداخل (Interferometer): جهاز يقيس خصائص موجة ما من خلال تداخلها مع موجة أخرى.

مقياس الطيف (مطياف) (Spectrometer): جهاز ضوئي يُستخدم للتحليل الطيفي وقياس خصائص الضوء.

مكوّنات وبنى أساسية (Building Blocks): إنّ المكوّنات والبنى الأساسيّة للمادة هي الجزيئات، أمّا للجزيئات فهي الذرّات، وللذرّات هي النوى والإلكترونات، وللنوى هي النكليونات، وهكذا.

منجم أوكلو (Oklo): منجم في الغابون، وُجد عام 1972 أنه يحتوي على مفاعل نووي انشطاري طبيعي.

مواءمة/ ملاءمة (Fit): اختيار قيم بارامترات النظرية لتُعطيَ نتائج أقرب ما يمكن إلى ما نرغب.

مواد نباتية وحيوانية وبقاياها (كتلة الكائنات الحيّة) (Biomass): الكمية الإجمالية للكائنات الحية، ويمكن استعمالها كمنبع للطاقة الحيوية.

موجات تدويمية (سبينية) (Spin Waves): اضطراباتٌ في الترتيب تنتشر في المادة المغناطيسية إذا كان لشبكتها تناظر مستمرّ، وهي إثارات جماعية منخفضة الطاقة تُدعى كمّاتها بالماغنونات (Magnons).

موجات مستقرّة (Standing Waves): موجات غير منتشرة تُكتب كجداء تابع جيبي للزمن بتابع جيبي للمكان.

موجات مقيَّدة (محتجَزة) (Trapped Waves): مفهوم فيزيائي مثاله النموذجي الإلكترونات في الذرّة حيث يعبَّر عنها بأمواج مقيّدة ضمنها.

موجات منتشرة (متحرّكة) (Traveling Waves): يُعبّر عن موجة سرعتها v وتنتشر في الاتّجاه k بتابع جيبي لتركيب خطّي من الزمن والمكان: $\psi (r, t) = A \sin (k. r - v. t + \varphi)$.

موضع ظاهري (Apparent Position): الموضع الذي يبدو فيه الجسم (نجم عادةً) حسب ما يراه المراقب، ويكون مختلفاً عن الموضع الصحيح بسبب آثارٍ فيزيائية أو هندسية.

موضع كتليّ (موضع الكتلة) (Mass Position): المجموع الشعاعي لأشعة موضع الجسيمات المنفردة التي تكوّن منظومةً ما موزونةً بكتلها.

مولّد (Generator): تعبير يدلّ في نظرية الزمر على أيّ عنصر في مجموعة تولّد ـ من خلال الجداء المنتهي لعناصر منها أو لمقلوباتها ـ الزمرةَ.

ميزون (Meson): هادرون بوزوني بتدويم (سبين) صحيح هو عبارة عن اتّحاد كوارك بكوارك مضادّ.

ميزونات الـ K (K-mesons): زوج كوارك وكوارك مضادّ يحتوي على كوارك غريب واحد (أو على مضادّه)، ولها أربعة أنواع: K^+ $= us, K = us, K^0 = ds, ds$.

ميزون ـ إيتا (Eta-Meson): تركيب معيَّن من كوارك وكوارك مضادّ $\eta = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}, \eta' = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{3}}$..

ميون (Muon): جسيم أوّلي شحنته e- وتدويمه (سبينه) 1/2، وعمر حياته حوالي 2,2 مكرو ثانية، وكتلته حوالي 150 MeV.

ناقلية فائقة/ ناقل فائق (Superconductivity/ Superconductor): قدرة بعض المواد (النواقل الفائقة) على إمرار تيّار كهربائي من دون أيّ مقاومة وعلى إقصاء أي حقل مغناطيسي داخلها.

نترينو (Neutrino): جسيم معتدل كهربائياً، يخضع فقط لتأثير القوة الضعيفة.

نجم قزم (Dwarf): مصير ستؤول إليه بعض النجوم (مثل شمسنا) عندما يتم استهلاك وقودها النووي، فتتحول إلى نجوم بيضاء صغيرة الحجم.

نجم نبضي (Pulsar): نجم نتروني دوّار ممغنط يصدر إشعاعاتٍ كهرمغناطيسية بشكل أمواج راديوية لا نلاحظها إلاّ عندما تكون الحزمة الصادرة متّجهةً نحو الأرض، ممّا يعطي النجمَ طبيعتَه النبضية.

نجم نتروني (Neutron Star): نجم يتشكل عقب الانهيار الثقالي لنجم كثيف خلال حادثة السوبرنوفا، وهو يتألّف فقط من النترونات التي يوقِف ضغطُها الانحلالي (Degeneracy) (الناجم عن مبدأ الاستبعاد) الانهيارَ.

نجوم الخلفية (Background Stars): نجوم بعيدة تبدو ظاهرياً وكأنها لا تتحرّك بالنسبة إلى النجوم الأخرى في السماء.

نسبية عامة (General Relativity): نظرية تمثّل صياغة إينشتاين لقوة الثقالة، تبيّن أنّ المكان والزمان ينقلان بتقوّسهما تأثيرات هذه القوة.

نشاط إشعاعي (Radioactivity): إجرائية تحلّل نوى ذريّة غير مستقرّة مع إطلاق طاقة على شكل إشعاع.

نصف قطر شفارتزشيلد (Schwarzchild Radius): حلّ لمعادلات النسبية العامة في حالة توزّع كروي للمادة؛ يُعَدّ احتمال وجود **الثقوب السوداء** أحد مقتضيات هذا الحل.

نطاقات المغنطة (Magnetic Domains): مناطق متميّزة في المادّة تتّصف بمغنطة منتظمة ضمن كلّ واحد منها.

نظريات توحيدية (Unified Theories): نظريات تصف في إطار شامل واحد جميعَ القوى وأشكال المادة.

نظرية (Theorem): قضيّة مشتقّة من نتائج سبق القبول بها انطلاقاً من موضوعات.

نظرية الـ م. (النظرية الأم) (M-Theory): نظرية انبثقت من ثورة الأوتار الفائقة الثانية، توحّد في إطار واحد نظريات الأوتار الفائقة الخمس السابقة، ويبدو أنها تتضمن 11 بعداً زمكانياً، رغم أنّ العديد من خصائصها التفصيلية لا يزال غامضاً وغير معروفٍ بعد.

نظرية الاضطراب (Perturbation Theory): إطار لتبسيط قضية شائكة من خلال إيجاد حلّ تقريبي لها يتمّ تشذيبه لاحقاً عند اعتبار تفاصيل أكثر لم تكن معروفة في البداية.

نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory): نظرية موحّدة للكون تقول بأن مكوّنات الطبيعة الأساسية ليست جسيمات نقطية لا أبعاد لها، بل أسلاك دقيقة ذات بعد واحد هي الأوتار. تحقّق هذه النظرية التوافق ما بين النسبية العامة وميكانيك الكمّ وهما النظريتان اللتان تصفان العالَمين الأكبر والأصغر من دون أن تكونا على توافق في ما بينهما.

نظرية الحقل (الحقول) الكمومي (Quantum Field Theory): نظرية كمومية لحقولٍ ـ كالحقل الكهرمغناطيسي ـ تتضمن النسبية الخاصة.

نظرية بمتغيّرات (متحوّلات) خفية (Hidden Variable Theory): نظرية تُعيد «عدم الحتمية» الكمومية إلى وجود متحوّلاتٍ في النظرية لا نعرف ماهيّتها بعد، بحيث إذا تحدّدت قيمُها صارت النتائج حتمية.

نظرية توحيدية كبرى (Grand Unified Theory) (GUT): نظرية تجمع القوى غير الثقالية الثلاث في إطار نظري واحد.

نظرية الزمر (Group Theory): فرعٌ من الجبر المجرّد يمثّل البنيان الرياضياتي الملائم لدراسة التناظر.

نظرية ظواهرية (Phenomenological Theory): نظرية تعبّر رياضياتياً عن نتائجَ ملحوظة لظاهرةٍ ما، وتربط في ما بينها من دون التركيز على معناها الأساسي في النظرية التحتية.

نظرية كلّ شيء (Theory of Everything): نظرية كمومية تضمّ كل أنواع القوى وأشكال المادة.

نظرية نوثر (Noether Theorem): نظرية رياضياتية تقول إنّ أيّ تناظر مستمرّ «تفاضلي» تتمتّع به نظرية فيزيائية يوافقه مقدارٌ فيزيائي مصون.

نظرية يانغ ـ ميلز (Yang-Mills Theory): نظريات معيار موضعية لا تبديلية.

نظير (Isotope): عنصر («نوكليد») تتفّق نواته مع نواة عنصر («نوكليد») آخر بعدد البروتونات وتختلفان بعدد النترونات.

نكهة (Flavor): عدد كمومي للجسيمات الأوليّة ذو صلة بتفاعلاتها الضعيفة (حيث ينجم عن تناظر معياري موضعي يمكن عبره تبديل الإلكترون مع نترينوه الموافق مثلاً) والشديدة (حيث يكون التناظر الموافق شمولياً وليس معيارياً موضعياً فلا يغيّر الكوارك مثلاً من نكهته عند إصداره لغليّون). هناك ستة كواركات وبالتالي 6 نكهات للكوارك وهكذا.

نمط (عيّنة) الاهتزاز (Mode of Vibration): نمطُ حركةٍ لمنظومة

ما تتحرّك وفقه جميع أجزائها جيبياً بنفس التواتر.

نمط (عيّنة) تداخل (Interference Pattern): عينة موجيّة تولّدها أمواج متداخلة ومتشابكة صادرة عن مواقع مختلفة.

نمط الصفر (النمط الصفري، العيّنة الصفرية) (Zero-Mode): شعاع ذاتي بقيمة ذاتية معدومة.

نموذج معياري (Standard Model): نظرية للقوى غير الثقالية الثلاث وتأثيرها على المادة تجمع ما بين الديناميك اللوني الكمومي ونظرية القوة الكهرضعيفة، وقد حققت نجاحاً باهراً.

نموذج معياري أصغري ذو التناظر الفائق (Minimal Supersymmetric Standard Model) (MSSM): نموذج نظري عبارة عن توسيع أصغري للنموذج المعياري يحقّق التناظر الفائق.

نواة (Nucleus): قلب الذرة، ويتكوّن من بروتونات ونترونات

نيازك/ شهب (Meteors): المسار المرئي لتجمّع جسيمات تتراوح أحجامها من حبّات الرمل إلى الصخور في المنظومة الشمسية.

هادرونات (Hadron): جسيمات أولية تكوّنها حالات مقيّدة من الكواركات ومضادّاتها.

هزّاز توافقي (Harmonic Oscillator): تعبير يعني في الفيزياء الكلاسيكية أيّ منظومة (مثل النابض) تخضع لقوة إرجاع متناسبة مع المطال (أي يكون الكمون تربيعياً)، فتكون الحركة جيبية عبر الزمن.

هندسة تفاضلية (Differential Geometry): فرع من الرياضيات يستخدم تقنيات الحساب التفاضلي والتكاملي من أجل دراسة مسائل في الهندسة.

هندسة جبرية (Algebraic Geometry): فرع من الرياضيات يجمع تقنيات الجبر ـ وخاصة الجبر التبديلي ـ مع تقنيات الهندسة، وله تطبيقات عديدة في مجالاتٍ كثيرة مثل التحليل العقدي والطوبولوجيا ونظرية الأعداد. . . إلخ.

هوائي (Antenna): وسيلة إرسال الموجات الكهرمغناطيسية واستلامها، ويعني ذلك أنّ الهوائي يحوّل تلك الموجات إلى تيارٍ كهربائي والعكس بالعكس.

هوموتوبيّة (تشوّه مستمرّ)، زمرة هوموتوبيّة (Homotopy, Homotopy Group): فرع من الطوبولوجيا يتناول المنحنيات المغلقة وتكافؤها مع بعضها حيث يكون المنحنيان متكافئَين إذا وُجد تشوّه مستمرّ ينقل أحدهما إلى الآخر؛ وبتزويد مجموعة صفوف علاقة التكافؤ الموصوفة أعلاه بعملية داخلية خاصّة نحصل على الزمرة الهوموتوبية.

واحدة (Unit): مقدار فيزيائي يُستخدم كأساس لمنظومة قياس، بحيث يُعبَّر بدلالته عن المقادير الأخرى المشتركة معه بالبعد الفيزيائي.

وتر (Hypotenuse): أطول الأضلاع في المثلث القائم.

وحدة فلكية (Astronomical Unit): المسافة بين الأرض والشمس، وتساوي تقريباً 150 مليون كم.

وعي (Consciousness): الكيفية التي يتواصل عبرها الكائن الحيّ مع أمور الوجود وظواهره ويحسّ بها، وتتعلّق مسألة الـ C (الوعي) بفهم هذه الكيفية.

وفرة نسبية/ توفّر (Abundance): مقدار الوجود النسبي لعنصرٍ ما (أو لمادة) بالمقارنة مع بقية العناصر، فمثلاً تُقارب الوفرة النسبية للهيدروجين في الكون نسبة الثلاثة أرباع.

يؤثّر على (يطبّق على)/ عملية (تأثير، تطبيق)/ مؤثِّر (Operate, Operation, Operator): يكوِّن عمليّةً وهي أسلوبٌ أو تطبيقٌ يولّد قيمة وحيدة ـ قد تتضمّن كائنات رياضياتية غير الأعداد ـ وفق قواعد معيّنة انطلاقاً من قيم معطاة؛ أمّا المؤثِّر فهو عادةً تابع يُطبّق على توابع للحصول على تابع جديد.

يدويّة: تفضيلُ (الانفراد بِـ) استعمال اليد اليمنى أو اليسرى،
يساريّ (يمينيّ) اليد (يساريّ أو يمينيّ اليدويّة) (Handedness, Left (Right)-Handed)

يصطدم/ حادثة صدم (Collide/ Collision): حادثة معزولة تدوم فترة قصيرةً يتفاعل خلالها جسيمان أو أكثر عبر قوىً كبيرة القيمة.

يكمِّم (Quantize): يعتبر الكائنات الكلاسيكية «المستمرّة» في نظريةٍ ما مكوّنةً من كمّات متقطّعة.

يمتصّ/ امتصاص (Absorb/ Absorption): عملية فيزيائية مميَّزة، مثالها النموذجي: قيام إلكترون بامتصاص فوتون وبالتالي الانتقال من سويّة طاقيّة إلى سويّة أعلى.

ثبت المصطلحات

Disturbance	إثارة/ إقلاق/ اضطراب
Lensing	أثر عَدَسي
Process	إجرائية/ عملية
Stress	إجهاد
Warping	التواء (انفتال)
Propagate/ Propagation	انتشار/ ينتشر
Nuclear fusion	اندماج نووي
Nuclear fission	انشطار نووي
Oscillation	اهتزاز/ تأرجح
Dimension	بُعد
Decomposition	تحليل
Transformation	تحوّل/ عملية تحويل
Reflection Transformation	تحويل الانعكاس
Galilean Transformation	تحويل غاليليو
Interference	تداخل
Correlation	ترابط
Quantum Fluctuations	تراوحات كمومية
Acceleration	تسارع
Configuration	تشكيلة

Quantum Corrections	تصحيحات كمومية
Inflation	تضخّم
Contraction	تقلّص
Condensation	تكاثف
Coherence	تماسك
Time Dilation	تمدّد الأزمنة
Symmetry	تناظر
Reflection Symmetry	تناظر الانعكاس
Rotational Symmetry	تناظر دوراني
Super Symmetry	تناظر فائق
Discrete Symmetry	تناظر متقطّع
Frequency	تواتر
Grand Unification	توحيد كبير
Planck's Constant	ثابت بلانك
Gravitation	ثقالة
Quantum Gravity	ثقالة كمومية
Hole	ثقب
Black Hole	ثقب أسود
Cartesian Product	جداء ديكارتي
Elementary Particle	جسيم أوّلي
Generation	جيل/ ذرية/ عائلة
Event	حادثة
Bound State	حالة مقيّدة
Electric Field	حقل كهربائي
Convection	حمل حراري
Spectral Lines	خطوط طيفية
Impulse	دفع
Subatomic	دون ذرّية

Simple Group	زمرة بسيطة
Product Group	زمرة الجداء
Subgroup	زمرة جزئية
Proper Time	زمن صرف
Angular Velocity	سرعة زاويّة
Amplitude	سعة
Quantum Amplitude	سعة كمومية
Color Charge	شحنة لونية
Strength	شدة/ متانة
Super Partner	شريك فائق
Absolute Zero	صفر مطلق
Invariance	صمود/ عدم تغيّر/ لاتغيّر
Bio Energy	طاقة حيوية
Potential Energy	طاقة كامنة
Zero Point energy	طاقة نقطة الصفر
Prime Number	عدد أوّلي
Atomic Number	عدد ذرّي
Moment of Inertia	عزم العطالة
Inertia	عطالة
Insight	فطنة/ نفاذ بصيرة/ تبصُّر
Astrophysics	فيزياء فلكية
Hyperbolic	قطع ـ زائدي
Parabolic	قطع ـ مكافئي
Strong Forces	قوى شديدة
Weak Forces	قوى ضعيفة
Critical Density	كثافة حرجة
Scalar Potential	كمون سلّمي
Electroweak	كهرضعيف

Top Quark	كوارك ذروي
Down Quark	كوارك سفلي
Up quark	كوارك علوي
Antiquark	كوارك مضاد
Accelerating universe	كون متسارع
Chirality	لاانطباقية
Non-Commutativity	لاتبديلية
Antimatter	مادة مضادّة
Dark matter	مادة مظلمة
Geodesic	متقاصِر
Isotropic	متناظر كروياً
Energy Level	مستوى طاقي
Equations of Motion	معادلات الحركة
Standing Waves	موجات مستقرّة
Apparent Position	موضع ظاهري
Dwarf	نجم قزم
Magnetic Domains	نطاقات المغنطة
Unified Theories	نظريات توحيدية
Group Theory	نظرية الزمر
Flavor	نكهة
Standard Model	نموذج معياري
Harmonic Oscillator	هزّاز توافقي
Algebraic Geometry	هندسة جبرية
Antenna	هوائي
Astronomical Unit	وحدة فلكية
Consciousness	وعي

المراجع

Books

Brewer, James W. and Martha K. Smith (eds.). *Emmy Noether: A Tribute to her Life and Work*. New York: M. Dekker, 1981.

Bukofzer, Manfred F. *Music in the Baroque Era*. New York: W. W. Norton, [1947].

Dick, Auguste. *Emmy Noether, 1882-1935*. Translated by H. I. Blocher. Boston: Birkhäuser, 1981.

Durnat, Will and Ariel Durant. *The Story of Civilization*. New York: Simon & Schuster, 1966; 1983.

Vol. 2: *The Life of Greece*.

Vol. 7: *The Age of Reason Begins*.

Feynman, Richard P. *The Feynman Lectures on Physics*. Reading, Ma: Addison-Wesley, 1963.

———. *What do You Care what Other People Think?: Further Adventures of a Curious Character. New York: Norton, 1988.*

Gardner, Martin. *The New Ambidextrous Universe: Symmetry and Asymmetry from Mirror Reflections to Superstrings*. New York, NY: W. H. Freeman, 1991.

Gell-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. New York: W. H. Freeman, 1994.

Gingerich, Owen. *The Book Nobody Read: Chasing the Revolutions*

of Nicolaus Copernicus. New York: Walker &Company, 2004.

Hesiod. *Theogony*. Translated, with an Introd., by Norman O. Brown. New York: Liberal Arts Press, [1953].

Jackson, John David. *Classical Electrodynamics*. 3rd Ed. New York: Wiley, 1999.

Koestler, Arthur. *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*. With an Introduction by Herbert Butterfield. London; New York: Arkana, 1959.

Lederman, Leon M. *The God Particle: If the Universe is the Answer, what is the Question?*. Boston: Houghton Mifflin, 1993.

Manchester, William. *A World Lit Only by Fire: The Medieval Mind and the Renaissance Portrait of an Age*. Boston: Back Bay Books, 1933.

Massie, Robert K. *Dreadnought: Britain, Germany, and the Coming of the Great War*. New York: Random House, 1991.

McGrayne, Sharon Bertsch. *Nobel Prize Women in Science: Their Lives, Struggles, and Momentous Discoveries*. Secaucus, N.J.: Carol Pub. Group, 1993.

Newsom, H. and J. Jones (eds.). *Origin of the Earth*. Oxford: Oxford University Press, 1990.

Noether, Emmy. *Gesammelte Abhandlungen = Collected Papers*. Herausgegeben von N. Jacobson. New York: Springer-Verlag, 1983.

Olsen, Lyn M. *Women of Mathematics*. Cambridge, MA.: MIT Press, 1974.

Park, Robert L. *Voodoo Science: The Road from Foolishness to Fraud*. New York: Oxford University Press, 2000.

Paschos, Emmanuel. *The Schemata of the Stars: Byzantine Astronomy from 1300 A. D.* Singapore: World Scientific Press, 1998.

Salam, Abdus and E. P. Wigner (eds.). *Aspects of Quantum Theory*. Cambridge: University Press, 1972.

Schweitzer, Albert. *J. S. Bach*. English Translation by Ernest

Newman. New York: Dover Publications, [1966].

Singh, Simon. *Fermat's Enigma: The Epic Quest to Solve the World's Greatest Mathematical* Problem. Foreword by John Lynch. New York: Walker, 1997.

Sobel, Dava. *Galileo's Daughter: A Historical Memoir of Science, Faith, and Love.* New York: Walker & Co., 1999.

———. *Longitude: The True Story of a Lone Genius who Solved the Greatest Scientific Problem of his Time.* New York: Walker, 1995.

Wald, Robert M. *Space, Time, and Gravity: The Theory of the Big Bang and Black Holes.* 2nd Ed. Chicago: University of Chicago Press, 1992.

Weinberg, Steven. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe.* New York: Basic Books, 1977.

———. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity.* New York: Wiley, [1972].

Will, Clifford M. *Was Einstein Right?: Putting General Relativity to the Test.* New York, NY: Basic Books, 1993

Periodicals

Benz, W., A. Cameron and H. J. Melosh. «The Origin of the Moon and the Single Impact Hypothesis III.» *Icarus*: vol. 81, 1989.

Bernstein, Jeremy. «Profiles: A Question of Parity.» *The New Yorker Magazine*: vol. 38, 1962

Burdidge, E. M. [et al.]. *Reviews and Modern Physics*: vol. 29, 1957.

Christenson, J. H. [et al.]. «Evidence for the 2 Pi Decay of the Meson.» *Physical Review Letters*: vol. 13, nos. 138-140, 1964.

———. «The Evolution of the Universe.» *Scientific American*: vol. 271, 1994.

Einstein, Albert. «On the Electrodynamics of Moving Bodies.» *Annalen der Physik*: vol. 17, 1905.

———. «The Late Emmy Noether: Professor Einstein Writes in Appreciation of a Fellow Mathematician.» *New York Times*: 4 March 1935.

Gorenstein, Daniel. «The Enormous Theorem.» *Scientific American*: vol. 253, no. 6, December 1985.

Hartle, J. B. and S. W. Hawking. «The Wave Function of the Universe.» Physical Review: D28, 1983.

Hill, Christopher T., Michael S. Turner and Paul J. Steinhardt. «Can Oscillating Physics Explain an Apparently Periodic Universe?» *Physics Letters*: B 252, 1990.

Hill, E. L. «Hamilton's Theorem and the Conversation Theorems of Mathematical Physics.» *Review of Modern Physics*: vol. 23, 1953.

Jackson, J. D. and L. B. Okun. «Historical Roots of Gauge Invariance.» *Reviews of Modern Physics*: vol. 73, 2001.

Kimberling, Clark. «Emmy Noether.» *The American Mathematical Monthly*: vol. 79, 1972.

Kimberling, Clark. «Emmy Noether, Greatest Woman Mathematician.» *Mathematics Teacher*: vol. 75, 1982.

Lee, T. D. and C. N. Yang. «Question of Parity Conversation in Weak Interactions.» *Physical Review*: vol. 104, 1956.

«Magnet Therapy: What's the Attraction?» *Science Daily*: 9 September 1999.

Park, Robert L. «America's Strange Attraction: Magnet Therapy for Pain.» *Washington Post*: 8 September 1999.

Peebles, Phillip James Edwin [et al.]. «The Case for the Relativistic Hot Big Bang Cosmology.» *Nature:* vol. 352, 1991.

Physical Review: vol. 73, 1948.

Reed, Christopher. «The Copernicus Quest.» *Harvard Magazine*: December 2003.

Weyl, Hermann. «Emmy Noether.» *Scripta Mathematica*: vol. 3, 1955.

Conferences

Teicher, Mina (ed.). *The Heritage of Emmy Noether*. Ramat-Gan, Israel: Gelbart Research Institute for Mathematical Sciences and the Emmy Noether Research Institute, 1999. (Israel Mathematical Conference Proceedings; V. 12).

Sites

www.ans.org

www.curtin.edu.au

www.cvc.org

www-gap.dcs.st and.ac.uk

www.galileoandeinstein.physics.virginia.edu

www.gps.caltech.edu

www.en.wikipedia.org

www.library.cern.ch

www.lpl.arizona.edu

www.map.gsfc.nasa.gov

www.pbs.org

www.ultraman.ssl.berkeley.edu

الفهرس

- أ -

- ب -

- ت -

- ث -

- ج -

- ح -

ـ ف ـ

ـ ق ـ

ـ ك ـ

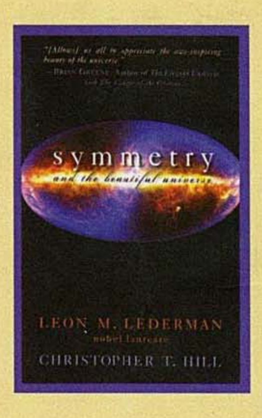
ـ هـ ـ

ـ و ـ

ـ ي ـ



التنــاظـر والكـون الجميل



«إذا كان هناك من مبدأ نظري قادنا إلى تحقيق تلك الإنجازات المذهلة في فهمنا للكون خلال المئة سنة الأخيرة، فإنه لا محالة مبدأ التناظر. لقد تمكّن ليون ليديرمان وكريستوفر هيل في كتابهما **التناظر والكون الجميل** من شرح جوهر هذا المبدأ البسيط والعميق معاً، وقدّما عجائبه بطريقة فنية ودقيقة، وزوّدا القرّاءَ، بنافذةٍ صافية يتأملّون من خلالها أكثرَ النظريات الفيزيائية دقةً، ما يجعلنا جميعاً قادرين على تذوّق جمال الكون وتقديره بكلّ روعته وهيبته».

بريان غرين (Brian Greene)، مؤلّف كتابَي **الكون الأنيق** (*Elegant Universe*) **وبنية نسيج الكون** (*The Fabric of the Cosmos*).

- **ليون ليديرمان:** فيزيائي أميركي حائز على جائزة نوبل للفيزياء عام 1988. من أهمّ إنجازاته: اكتشاف نترينو الميون (Muon Neutrino) عام 1962 والكوارك القعري (Bottom Quark) عام 1977.
- **كريستوفر هيل:** فيزيائي نظري أميركي يرأس حالياً قسم الفيزياء النظرية في مخبر مسرّع فيرمي الوطني (الفيرميلاب) (Fermi National Accelerator Laboratory).
- **نضال شمعون:** فيزيائي نظري سوري يعمل في المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا في دمشق.

- أصول المعرفة العلمية
- ثقافة علمية معاصرة
- فلسفة
- علوم إنسانية واجتماعية
- تقنيات وعلوم تطبيقية
- آداب وفنون
- لسانيات ومعاجم



المنظمة العربية للترجمة

الثمن: 20
أو ما يعا